

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра Телекомунікаційних систем

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Леонід УРИВСЬКИЙ

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Телекомунікаційні системи та
мережі»
на тему: «Аналіз механізмів синхронізації в бездротових персональних
мережах»

Виконав:

студент IV курсу, групи ТС-71

Рибка Андрій Сергійович _____

Керівник:

Доцент кафедри ТС, к.т.н., доцент

Максимов Володимир Васильович _____

Рецензент:

Доцент кафедри ІТМ, к.т.н., доцент

Кононова Ірина Віталіївна _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Телекомунікаційних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Леонід УРИВСЬКИЙ

« ____ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Рибки Андрію Сергійовичу

1. Тема роботи «Аналіз механізмів синхронізації в бездротових персональних мережах», керівник роботи Максимов Володимир Васильович, доцент кафедри ТС, затверджені наказом по університету від 14.04.2021 р. №1007-с.
2. Термін подання студентом роботи 9 червня 2021 року.
3. Вихідні дані до роботи: бездротові персональні мережі, технології бездротової передачі даних. Стандарт 802.15.4. Стандарт 802.15.3
4. Зміст роботи:
-Аналіз механізмів синхронізації в бездротових персональних мережах
Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)
5. Дата видачі завдання 02.12.2020р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз отриманого завдання	10.12.2020	
2.	Постановка мети дипломної роботи та розробка пунктів змісту	15.01.2021	
3.	Написання та оформлення вступної частини пояснювальної записки	07.02.21	
4.	Написання та оформлення першого розділу пояснювальної записки	21.03.2021	
5.	Написання та оформлення другого розділу пояснювальної записки	18.04.2021	
6.	Написання та оформлення третього розділу пояснювальної записки	27.05.2021	
7.	Висновки	04.06.2021	
8..	Чистовий варіант дипломної роботи, плакати	08.06.2021	

Студент

Андрій РИБКА

Керівник роботи

Володимир МАКСИМОВ

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота містить: 66 сторінки, 22 рисунків, 5 таблиць та 30 посилань на літературу.

Метою роботи є аналіз механізмів синхронізації в бездротових персональних мережах.

В даній роботі розглядаються бездротові персональні мережі різних типів, їх класифікація та призначення, технології та стандарти які використовуються в даних мережах.

Ідея використання бездротових персональних мереж є дуже привабливою через свою безпеку, у порівнянні зі звичайним провідним з'єднанням та низьким рівнем споживання енергії, а також компактністю для можливості вбудовування в невеликі портативні пристрої. Проведено комплексний аналіз принципів синхронізації в протоколах наведених в даній роботі.

БЕЗДРОТОВІ ПЕРСОНАЛЬНІ МЕРЕЖІ, ПОНЯТТЯ БЕЗДРОТОВИХ ПЕРСОНАЛЬНИХ МЕРЕЖ

ABSTRACT

The diploma contains: 66 pages, 22 figures, 5 tables and 30 sources.

The purpose of the work is to analyze synchronization mechanisms in wireless personal networks.

In this paper we consider various types of wireless networks, their classification and purpose, technologies and standards used in these networks.

The idea of using wireless personal networks is very attractive because of its security, compared to a conventional wired connection, and its low power consumption and compact size for embedding in portable devices. A comprehensive analysis of the principles of synchronization in the protocols given in this paper is carried out.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
1 ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ БЕЗДРОТОВИХ ПЕРСОНАЛЬНИХ МЕРЕЖ.....	9
1.1 Огляд сучасних систем бездротового персонального зв'язку	10
1.1.1 IEEE 802.15.....	12
1.1.2 Bluetooth	14
1.1.3 Технологія UWB.....	23
1.1.4 Wireless USB (WUSB)	26
1.1.5 HomeRF	27
1.1.6 Технологія інфрачервоного випромінювання (IrDA).....	28
1.2 Висновки до розділу 1	30
2 ВИСОКОШВИДКІСНІ ТА НИЗЬКОШВИДКІСНІ МЕРЕЖІ СТАНДАРТІВ IEEE 802.15.3/802.15.4	31
2.1 Специфікація IEEE 802.15.3	31
2.1.1 Специфікація IEEE 802.15.3a	34
2.1.2 Специфікація IEEE 802.15.3b-2006	38
2.1.3 Специфікація IEEE 802.15.3c-2009.....	39
2.2. Низькошвидкісні мережі стандарту IEEE 802.15.4 (ZIGBEE)	40
2.2 Висновки до розділу 2.....	49
3 ПРИНЦИПИ СИНХРОНІЗАЦІЇ ВИСОКО ТА НИЗЬКОШВИДКІСНИХ СТАНДАРТІВ 802.15.3(4)	50
3.1 Вимоги синхронізації в IEEE 802.15.3	50
3.2. Вимоги синхронізації в IEEE 802.15.4	55
3.2.1. Синхронізація в протоколі ZigBee.....	57
3.3.Висновки до розділу 3.....	63
ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	65

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ERD	Enhanced Data Rate – Покращена швидкість передачі даних
NFC	Near field communication – Комунікація ближнього поля
WPAN	Wireless personal area network – бездротові персональні мережі
PAN	Personal Area Network – Персональна мережа
PHY	Physical layer – фізичний рівень
MAC	Media Access Control – управління доступом до носія
WLAN	Wireless Local Area Network – бездротова локальна мережа
BAN	Body Area Network – Натільний комп'ютерна мережа
VLC	Visible Light Communication – зв'язок по видимому світлу
SIG	Special Interest Group – Група спеціальних інтересів
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum – псевдовипадкове перелаштування робочої частоти
TDD	Time Division Duplexing – Дуплексний канал з часовим розподіленням
ARQ	Automatic Repeat Request – Автоматичний запит повторної передачі
EDR	Enhanced Data Rate – покращена швидкість передачі даних
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers – інститут інженерів з електротехніки та електроніки
CAP	Contention Access Period – Час конкурентного доступу
UWB	Ultra-Wide Band – широкопasmовий зв'язок
OS	Operating System – операційна система
QoS	Quality of Service – якість обслуговування

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Бездротові технології впевнено впроваджуються замість дротових, там де вони можуть забезпечити прийнятні швидкість та якість зв'язку. Вони широко використовуються в житті багатьох мільйонів людей та у великій кількості підприємств, оскільки дозволяють вирішувати великий спектр задач.

Прикладом цього можуть слугувати бездротові персональні мережі (WPAN, Wireless personal area network). Вони використовуються для підключення різних пристроїв, в тому числі комп'ютерної, побутової та оргтехніки, засобів зв'язку і т. д. Радіус дії даної мережі становить від декількох десятків сантиметрів до кількох метрів. WPAN використовується як для об'єднання окремих пристроїв між собою, так і для зв'язку їх з мережами вищого рівня, наприклад, глобальною мережею інтернет.

До даного класу зазвичай відносять технології, побудовані за стандартами Bluetooth, HomeRF (SWAP), Wireless USB (WUSB), IEEE 802.15.3, IEEE 802.15.3a, IEEE 802.15.4 (ZigBee), IrDA. Крім того, до класу WPAN можна віднести ряд технологій надширокопasmового зв'язку (UWB), стандарти на які остаточно поки не визначені.

Метою даної дипломної роботи являється проведення аналізу механізмів синхронізації в бездротових персональних мережах.

1 ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ БЕЗДРОТОВИХ ПЕРСОНАЛЬНИХ МЕРЕЖ

В сьогоденню епоху цифрових технологій існує безліч способів комунікації та обміну інформацією. Зараз передача даних між різними пристроями відбувається досить просто та безпечно. Якщо раніше щоб завантажити різний контент до свого мобільного телефону було потрібно з'єднання через кабель з комп'ютером, то зараз це можна зробити швидше та надійніше завдяки бездротовим технологіям. Складно представити сучасне життя без наявності в ньому електронних пристроїв. Для поліпшення комфорту життя велику кількість приладів побуту пробують об'єднати в одну мережу та керувати віддалено.

Люди прагнуть бути необмеженим дротовим з'єднанням, саме тому розвиваються технології бездротової комунікації: Bluetooth, точки доступу Wifi, безконтактна оплата, навіть зарядні механізми мають можливість бездротового з'єднання.

На підприємствах повстає дилема незручності через надмірну кількість проводів, які перешкоджують та займають багато місця. Тому для спрощення процесу передачі даних роблять заміну такого виду з'єднання на бездротове. Використання бездротового з'єднання дає змогу підключення пристроїв без візуального контакту з ними, що є дуже зручним.

Таким чином, в кінці XX століття була сформульована концепція «розумного пилу» (smart dust)- системи, що складається з довільної кінцевої безлічі електромеханічних пилинок здатних обмінюватися інформацією в довільній просторовій конфігурації. Втілення цієї концепції на практиці надалі призвело до появи бездротових мереж.

1.1 Огляд сучасних систем бездротового персонального зв'язку

Бездротові персональні мережі виникли з розвитком персональних мереж (англ. Personal Area Network, PAN). Персональна мережа – це мережа, побудована «навколо» людини. PAN являє собою комп'ютерну мережу, яка використовується для передачі даних між пристроями, такими як комп'ютери, телефони, планшети та персональні кишенькові комп'ютери (ПКМ). Персональні мережі можуть використовуватися як для інформаційної взаємодії окремих пристроїв між собою (інтерперсональна комунікація), так і для з'єднання їх з мережами вищого рівня, наприклад, глобальної мережі Інтернет (висхідна лінія зв'язку), де один «первинний» пристрій бере на себе роль інтернет – маршрутизатора.

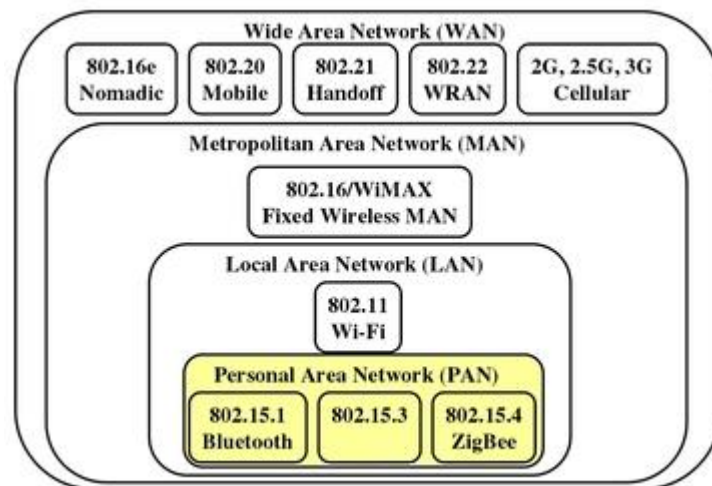


Рисунок 1.1-Персональна мережа

Бездротова персональна мережа (WPAN) є малопотужною PAN, яка організовується на невеликій відстані з використанням бездротових мережевих технологій. WPAN працює в ISM-діапазоні 2.4-2.5 ГГц. Вибір діапазону обумовлений тим, що цей діапазон доступний по всьому світу і підходить для низько бюджетних рішень. WPAN складається з декількох вузлів, пов'язаних бездротовим каналом, при цьому один з цих вузлів бере на себе роль координатора. Координатор займається створенням WPAN і контролює підключення вузлів до мережі.

WPAN може являти собою наступні топологічні схеми:

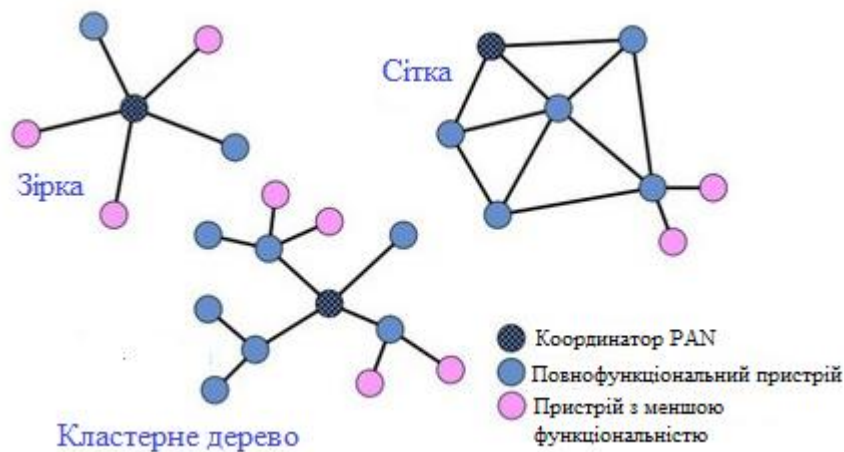


Рисунок 1.2 - Топологічні схеми WPAN

Бездротові персональні мережі WPAN стали з'являтися в кінці 90-х років XX століття, коли розвиток мікроелектроніки дозволив створити під них дешеву інтегральну елементну базу. Головною особливістю таких мереж є малий радіус дії, котрий зазвичай не перевищує декількох метрів, але з розвитком технологій цей діапазон значно збільшився.

Технологія Bluetooth стала першою технологією, що дозволяє організувати бездротову персональну мережу передачі даних (WPAN - Wireless Personal Network). Вона була створена у 1998 році компаніями: Ericsson, IBM, Intel, Nokia, Toshiba, котрі об'єдналися в організацію SIG.

Сучасні WPAN можуть бути реалізовані за допомогою таких технологій, як:

- Bluetooth
- INSTEON
- IrDA
- Wireless USB
- Z-Wave
- ZigBee

1.1.1 IEEE 802.15

IEEE 802.15 - це робоча група IEEE, що входить до комітету стандарту IEEE 802. Група займається визначенням стандарту бездротових персональних мереж (WPAN). Містить сім цільових груп:

Цільова група 1: WPAN / Bluetooth

Перша група сфокусована на Bluetooth-технології. Вона визначає фізичний рівень (PHY) і рівень управління доступом до середовища (MAC) для бездротового з'єднання стаціонарних і портативних пристроїв в межах особистого або робочого простору. Стандарти були прийняті у 2002 і 2005 роках[1][2].

Цільова група 2: Вирішення конфліктів

Друга група визначає співіснування бездротових персональних мереж (WPAN) з іншими бездротовими пристроями, що працюють на неліцензованих частотних діапазонах, таких, як бездротові локальні мережі (WLAN). Стандарт IEEE 802.15.2-2003 був опублікований у 2003 році[3], після чого діяльність цільової групи 2 було припинено[4].

Цільова група 3: Високошвидкісні WPAN

Стандарт IEEE 802.15.3-2003 визначає фізичний рівень (PHY) і рівень управління доступом до середовища (MAC) в високошвидкісних (від 11 до 55 Мбіт / с) WPAN.

Цільова група 4: Низько швидкісні WPAN

Стандарт IEEE 802.15.4-2003 забезпечує низьку швидкість передачі даних в сукупності з дуже тривалим часом автономної роботи та низькою складністю пристроїв. Стандарт визначає як фізичний (рівень 1), так і канальний (рівень 2) рівні моделі OSI. Перша версія стандарту 802.15.4 була випущена в травні 2003 року. Деякі стандартизовані й пропрієтарні протоколи мережевого рівня працюють над 802.15.4-мережами (IEEE 802.15.5, ZigBee, 6LoWPAN, WirelessHART і ISA100.11a).

Цільова група 5: Mesh мережі

IEEE 802.15.5 надає архітектурний каркас, що дозволяє будувати на основі

WPAN-пристроїв сумісні, стабільні та масштабовані бездротові Mesh-мережі. Стандарт складається з двох частин: низькошвидкісні й високошвидкісні WPAN Mesh-мережі. Низькошвидкісні Mesh-мережі будуються на IEEE 802.15.4-2006 MAC, тоді як високошвидкісні - на IEEE 802.15.3 / 3b MAC. В обох типах мереж підтримуються такі опції, як ініціалізація мережі, адресація і багатокрокове поширення. Крім того, низько швидкісна Mesh-мережа підтримує групову адресацію, забезпечення надійності мовлення, переноситься підтримку, трасування маршруту і функції економії енергії, а високошвидкісна Mesh-мережа підтримує multihop-обслуговування реального часу.

Цільова група 6: Технології моніторингу показників тіла людини

У грудні 2011 року була створена цільова група IEEE 802.15.6 для розробки стандарту мереж датчиків моніторингу показників тіла людини (Body Area Network, BAN). Проєкт був затверджений 22 липня 2011 року заочним голосуванням[5]. Цільова група 6 була сформована в листопаді 2007 р. і працювала над стандартом енергоефективних бездротових пристроїв низької дальності[6][7], оптимізованих для роботи на (в) тілі людини (або іншого живого організму) і забезпечують роботу різних медичних, побутових або розважальних програм.

Цільова група 7: Зв'язок за допомогою видимого світла

У грудні 2011 року цільова група для розробки стандарту IEEE 802.15.7 завершила визначення фізичного і MAC-рівнів для зв'язку з видимого світла (англ. Visible Light Communication, скор. - VLC). Протягом січня 2009 року проводились засідання групи, на яких обговорювалося написання стандарту атмосферної оптичної лінії зв'язку (англ. Free-space optical communication), що використовує VLC[8].

Постійний комітет бездротового зв'язку наступного покоління

Постійний комітет IEEE P802.15 був створений для полегшення і стимулювання презентацій та дискусій на тему нових бездротових технологій. Комітет може ініціювати нові стандартизовані проєкти й адресовувались робочій групі 802.15 розв'язання питань і виправлення помилок, пов'язаних з технологіями

та методами побудови бездротових персональних мереж[9].

1.1.2 Bluetooth

Роботи зі створення Bluetooth почав виробник телекомунікаційного устаткування Ericsson в 1994 році як бездротову альтернативу кабелям RS-232. Спочатку ця технологія була пристосована під потреби системи FLYWAY в функціональному інтерфейсі між мандрівниками та системою.

Специфікація Bluetooth була розроблена групою Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG), яка була заснована в 1998 році. До неї увійшли компанії Ericsson, IBM, Intel, Toshiba і Nokia. Нині до розробки в області Bluetooth, до даної організації входять також Lucent, Microsoft та інші компанії, чия діяльність пов'язана з мережевими технологіями. Згодом Bluetooth SIG і IEEE досягли угоди, на основі якої специфікація Bluetooth стала частиною стандарту IEEE 802.15.1 (дата опублікування – 14 червня 2002 року)[10].

Технологія Bluetooth використовує неліцензований в ряді країн діапазон частот 2,45 GHz (точніше, 2400 - 2483,5 MHz). Це так званий діапазон ISM - Industry, Science and Medicine, тобто діапазон, призначений для промисловості, наукових досліджень і медицини. Стандарт Bluetooth описує пакетний спосіб передачі інформації з тимчасовим мультиплексуванням[10].

Розширення спектру

У радіотракті використовується метод розширення спектру за допомогою частотних стрибків (Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS, або Псевдовипадкове Перестроювання Робочої Частоти - ППРЧ). При цьому загальна смуга частот ділиться на 79 фізичних підканалів шириною 1 МГц.

Перестроювання частоти здійснюється шляхом зміни несучої частоти з одного підканалу на інший у відповідності із заданою в стандарті псевдовипадковою послідовністю.

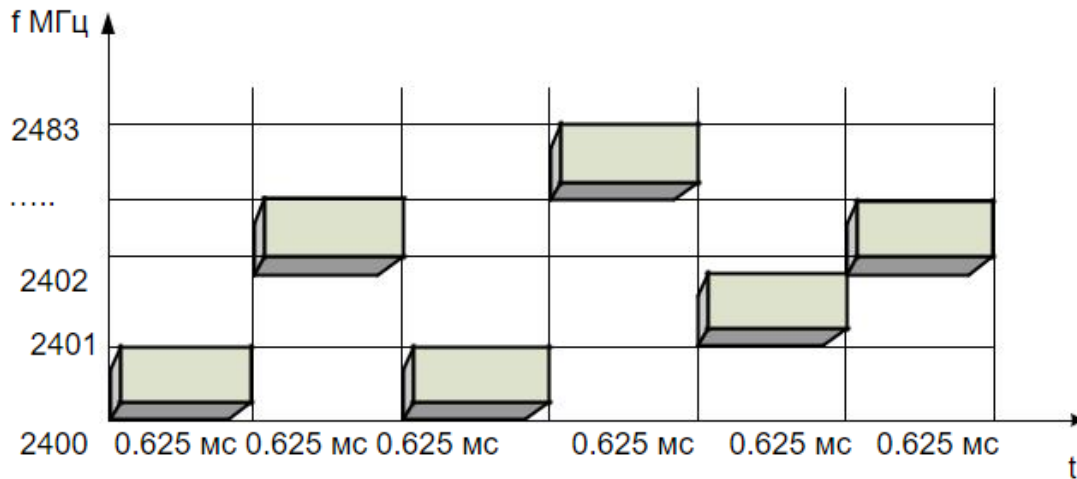


Рисунок 1.3-Використання методу FHSS в стандарті Bluetooth

Пристрої однієї пікомережі використовують загальну псевдовипадкову послідовність перестроювання частоти. Кожна послідовність задає свій фізичний канал. Тривалість передачі сигналу на одній частоті становить 0.625 мс. В цьому часовому вікні (слоті) здійснюється передача пакету даних. Швидкість зміни частотних підканалів становить $1/0.625 = 1600$ раз/с. Для розділення мереж використовуються різні послідовності перестроювання частоти. Такий метод забезпечує конфіденційність і завадозахищеність передачі. Остання обумовлена тим, що якщо переданий по якомусь підканалі пакет не був прийнятий, то приймач повідомляє про це і передача пакета повторюється на одному з наступних підканалів, тобто вже на іншій частоті. Конфіденційність передачі, крім того, що передача даних ведеться в пакетному режимі методом частотних стрибків, додатково забезпечується аутентифікацією пристроїв і 128-бітовим шифруванням. Частотні стрибки та аутентифікація також покликані розв'язувати проблему перевантаження мережі при одночасній роботі безлічі Bluetooth-пристроїв.

Типи логічних з'єднань

Протокол Bluetooth підтримує логічні з'єднання типу "точка - точка" і "точка - багато точка", два і більше використовують один і той же канал пристрою утворюють піко мережу (piconet). Один з пристроїв піко мережі працює як основний (master), а решта - як підлеглі (slaves). В одній піко мережі може бути до

семи активних підлеглих пристроїв, при цьому інші підлеглі пристрої знаходяться в стані "паркування", залишаючись синхронізованими з основним пристроєм. Всього в одній піко мережі може бути залучено до 256 окремих пристроїв. Взаємодіючі піко мережі утворюють "розподілену мережу" (scatternet), причому кількість пристроїв, залучених в ній, не обмежена.

У кожній піко мережі діє тільки один основний пристрій, проте підлеглі пристрої можуть входити в різні піко мережі. Крім того, основний пристрій однієї піко мережі може бути підлеглим в іншій. Піко мережі не синхронізовані між собою за часом та частотою - кожна використовує свою послідовність частотних стрибків. У межах однієї піко мережі всі пристрої синхронізовані за часом та частотам. Псевдовипадкова послідовність стрибків унікальна для кожної піко мережі та визначається фізичною адресою її основного пристрою. Довжина циклу псевдовипадкової послідовності - 227 елементів.

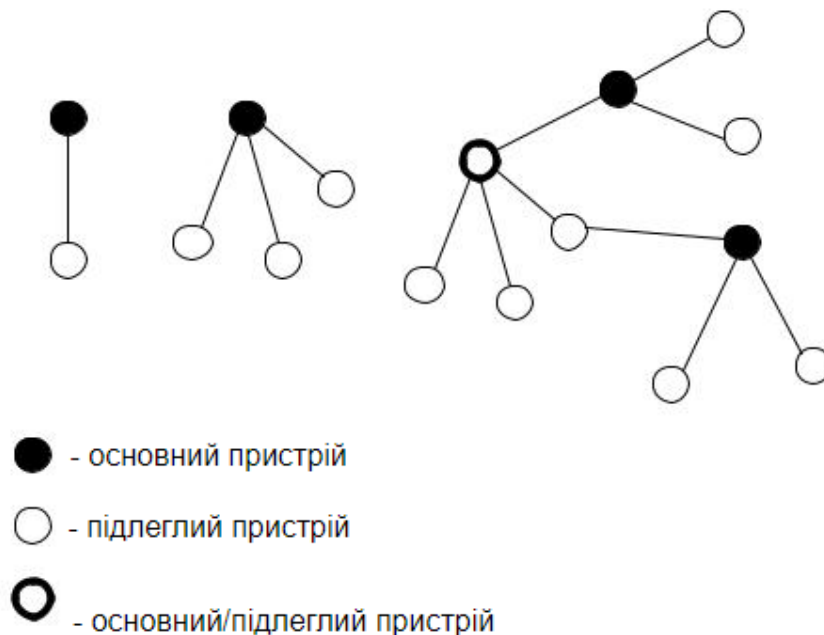


Рисунок 1.4-Можливі топології пікомережі Bluetooth

Стандартом Bluetooth передбачена дуплексна передача на основі методу поділу часу (TDD - time division duplexing). Головний блок передає пакети в непарні тимчасові сегменти, а підпорядкований пристрій - в парні. Пакети в

залежності від довжини можуть займати до п'яти тимчасових сегментів, при цьому частота каналу не змінюється до закінчення передачі пакета.

Протокол Bluetooth 1.1 може підтримувати асинхронний канал даних, до трьох синхронних (з постійною швидкістю) голосових каналів або канал з одночасною асинхронною передачею даних і синхронною передачею голосу. Швидкість кожного з трьох голосових каналів - 64 кбіт / с в кожному напрямі, асинхронного в асиметричному режимі - до 723,2 кбіт / с в прямому і 57,6 кбіт / с у зворотному напрямку або до 433,9 кбіт / с в кожному напрямі в симетричному режимі. Максимальна теоретична швидкість передачі даних становить 1 Мбіт / с.

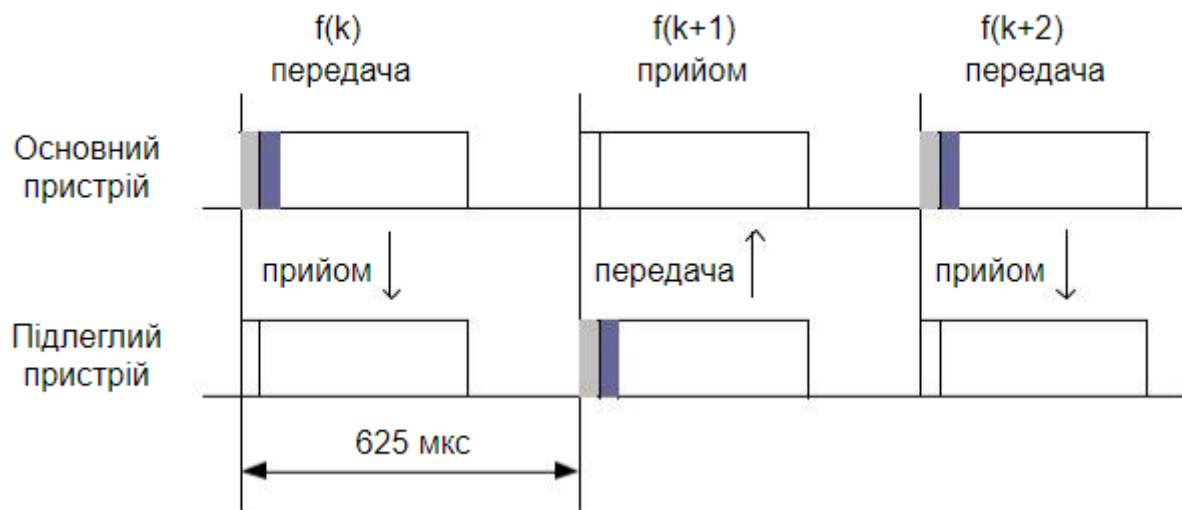


Рисунок 1.5-Дуплексна передача з часовим розділенням

Синхронне з'єднання (SCO) можливе тільки в режимі точка-точка. Такий спосіб зв'язку застосовується для передачі інформації, яка є чутлива до затримок наприклад, голосу.

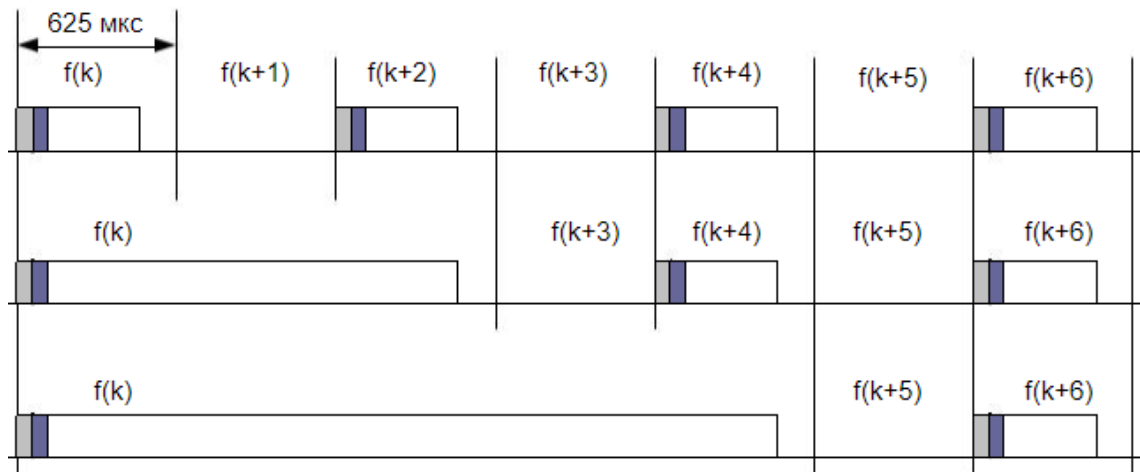


Рисунок 1.6-Передача пакетів різної довжини

Головний блок підтримує до трьох синхронних з'єднань, допоміжне - до трьох з одним основним пристроєм або до двох - з різними основними пристроями. При синхронному з'єднанні навіть якщо пакет прийнятий з помилкою, повторно він не передається.

Асинхронне з'єднання (ACL) використовує тимчасові сегменти, які не зарезервовані для синхронного з'єднання. Воно можливо між основним і всіма активними підлеглими пристроями в піко мережі. Основний та підпорядкований пристрій можуть підтримувати тільки одне асинхронне з'єднання, причому підпорядкований пристрій відправляє пакет основному тільки в тому випадку якщо в попередньому часовому інтервалі в його адресу прийшов пакет від основного пристрою (так визначається черговість передачі, якщо в піко мережі бере участь більше одного підлеглого пристрою). Якщо в адресному полі ACL-пакета адреса не вказана, пакет вважається широкомовною і його можуть приймати всі пристрої піко мережі. Асинхронне з'єднання застосовується для передачі даних, чутливих до помилок, тому воно дозволяє повторно передавати пакети, прийняті з помилками (механізм ARQ - automatic repeat request).

Кожному пристрою Bluetooth спочатку при виробництві присвоюється унікальна 48-розрядна фізична адреса або Bluetooth-адреса. Вона слугує для ідентифікації та реєстрації пристроїв в мережі, для звернення до неактивних пристроїв, але при безпосередньому обміні пакетами не використовується.

Мережі стандарту IEEE 802.15.1 базуються на специфікації Bluetooth v.1.1 (1999), яка визначає рівні управління доступом. У версії 1.2 швидкості передачі даних вищі, ніж у версії 1.1. Вони можуть досягати 723 кбіт/с. Радіус дії таких мереж не перевищує 10 м. Для них характерні швидке підключення і виявлення.

Bluetooth версії 2.0 був випущений 10 листопада 2004 г. Має зворотну сумісність з попередніми версіями 1.x. Основним нововведенням стала підтримка Enhanced Data Rate (EDR) для прискорення передачі даних.

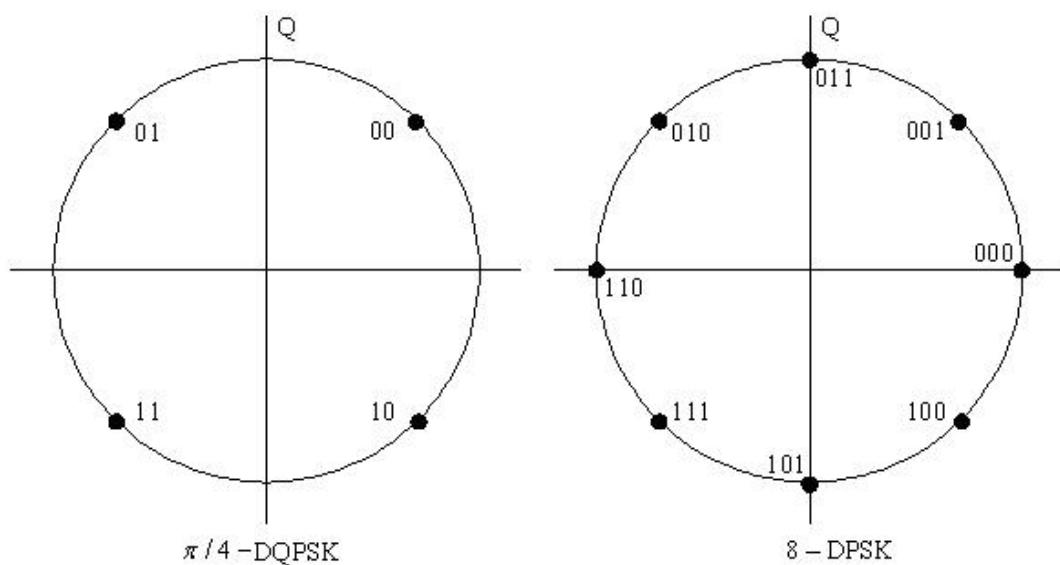


Рисунок 1.7-Модуляційні символи в режимі EDR

Номінальна швидкість EDR - близько 3 Мбіт / с, проте на практиці це дозволило підвищити швидкість передачі даних тільки до 2,1 Мбіт / с [12]. Згідно зі специфікацією 2.0 + EDR, в EDR є наступні переваги:

- У деяких випадках збільшення швидкості передачі в три рази (2,1 Мбіт / с).
- Зменшення складності декількох одночасних підключень через додаткової смуги пропускання.
- Зниження споживання енергії завдяки зменшенню навантаження.

Наступним кроком у вдосконаленні технології Bluetooth стала поява версії стандарту 2.1 у 2007 році, основним нововведенням якої є технологія NFC (Near

Field Connection). Вона дозволяє швидко встановлювати з'єднання при знаходженні пристроїв в безпосередній близькості один від одного. Крім цього, даною версією стандарту підтримується енергозберігаюча технологія Sniff Subrating, а також забезпечується збільшення безпеки з'єднання і зменшення часу його встановлення в порівнянні з попередніми версіями[10].

У першій половині 2009 року групою Bluetooth SIG була опублікована специфікація технології Bluetooth версії стандарту 3.0. Версія 3.0 на порядок підвищує швидкість передачі даних в порівнянні з версією 2.1, що в перспективі дозволить легко переміщати мультимедійну інформацію, що має великі обсяги, між мобільними пристроями. Заявлена теоретична швидкість передачі даних 54 Мбіт / с. Причому досягається така швидкість досить незвичайним способом: замість створення оновленого протоколу Bluetooth і відповідного чіпа було вирішено пристосувати під свої потреби вже наявні апаратні рішення. У пристрої з підтримкою Bluetooth 3.0 передбачається вбудовувати два чіпи - контролери Bluetooth і WLAN. За установку зв'язку між пристроями відповідає технологія Bluetooth, але як тільки Bluetooth-контролер визначає, що повинні передаватися дані великого обсягу, він перевіряє, чи підтримує інший пристрій режим роботи Bluetooth High Speed (HS). Якщо режим HS підтримують обидва пристрої, для передачі даних буде залучений контролер WLAN і передача буде вестися з високою швидкістю. Якщо ж один з пристроїв не підтримує цей режим, передача буде здійснюватися через контролер Bluetooth зі швидкістю близько 2 Мбіт / с (як у попередній версії стандарту), чим досягається повна зворотна сумісність технології з раніше випущеними пристроями. По завершенні передачі канал в режимі WLAN закривається в цілях економії енергії[11].

Спочатку ідея об'єднання технологій виникла у зв'язку з тим, що використання WLAN в чистому вигляді для з'єднань типу "точка - точка" було пов'язане з порівняно складною процедурою встановлення з'єднання. Переклавши цю задачу на технологію Bluetooth, процедуру вдалося значно спростити та автоматизувати. Крім того, оскільки особливістю Bluetooth 3.0 є можливість використання сторонніх апаратних засобів інтерфейсу WLAN стандарту 802.11g

(які на сьогодні стандартно вбудовуються в безліч мобільних пристроїв), з'являється можливість значно збільшити швидкість передачі даних практично без збільшення вартості апаратної частини пристрою.

Ще одним нововведенням Bluetooth 3.0 є Unicast Connectionless Data - одностороння передача даних без встановлення з'єднання, яка потрібна, наприклад, для пульта дистанційного керування і в ряді інших випадків. Для більш ранніх стандартів Bluetooth реалізація такої функції була неможлива[11].

30 червня 2010 року Bluetooth SIG затвердив специфікацію Bluetooth 4.0[12]. Містити протоколи:

- Класичний Bluetooth,
- високошвидкісний Bluetooth
- Bluetooth з низьким енергоспоживанням.

Високошвидкісний Bluetooth заснований на Wi-Fi, а класичний Bluetooth складається з протоколів попередніх специфікацій Bluetooth.

Частоти роботи системи Bluetooth (потужність не більше 0,0025 Вт).

Смуга частот 2,402 - 2,48 ГГц

Протокол Bluetooth з низьким енергоспоживанням призначений, перш за все, для мініатюрних електронних датчиків (використовуються в спортивному взутті, тренажерах, мініатюрних сенсорах, що розміщуються на тілі пацієнтів і т. Д.). Низький рівень споживання енергії досягається шляхом використання особливого алгоритму роботи. Передавач включається тільки на час відправки даних, що забезпечує можливість роботи від однієї батарейки типу CR2032 протягом декількох років[13]. Стандарт надає швидкість передачі даних 1 Мбіт / с при розмірі пакета даних 8-27 байт. У новій версії два Bluetooth-пристрої можуть встановлювати з'єднання менш ніж за 5 мс і підтримувати його на відстані до 100 м. Для цього використовується вдосконалена корекція помилок, а необхідний рівень безпеки забезпечує 128-бітове AES-шифрування.

Датчики температури, тиску, вологості, швидкості пересування і т. Д. На базі цього стандарту можуть передавати інформацію на різні пристрої контролю: мобільні телефони, ПКМ, ПК і т. П.

Перший чіп з підтримкою Bluetooth 3.0 і Bluetooth 4.0 був випущений компанією ST-Ericsson в кінці 2009 року. Нині випускається велика кількість мобільних пристроїв з підтримкою цього стандарту.

В кінці 2013 року Bluetooth Special Interest Group (SIG) представила специфікацію Bluetooth 4.1[12]. Одне з поліпшень, реалізованих в специфікації Bluetooth 4.1, стосується спільної роботи Bluetooth і мобільного зв'язку четвертого покоління LTE. Стандарт передбачає захист від взаємних перешкод шляхом автоматичного координування передачі пакетів даних.

3 грудня 2014 Bluetooth Special Interest Group (SIG) представила специфікацію Bluetooth 4.2[14]. Основні поліпшення - підвищення конфіденційності та збільшення швидкості передачі даних.

16 червня 2016 року Bluetooth Special Interest Group (SIG) представила специфікацію Bluetooth 5.0[15][16]. Зміни торкнулися в основному режиму з низьким споживанням і швидкісного режиму. Радіус дії збільшений в чотири рази, швидкість збільшена вдвічі. Також версія Bluetooth 5.0 повністю сумісна з попередніми версіями Bluetooth.

Від попередніх версій Bluetooth 5.1 відрізняється тим, що у користувачів є можливість визначати місце розташування й напрямок з максимальною точністю[17].

Специфікація Bluetooth 5.2 опублікована SIG 6 січня 2020 року[18]. Нові функції:

Поліпшена версія протоколу атрибутів ATT - Enhanced Attribute protocol (EATT), який більш безпечний, тому що використовує тільки шифрування з'єднання. EATT підтримує паралельні транзакції, а також дозволяє змінювати блок максимальної передачі ATT (MTU) під час з'єднання. У EATT доданий новий L2CAP режим безпечного управління потоком - Enhanced Credit Based Flow Control Mode.

Новий LE Power Control - дозволяє пристроям динамічно оптимізувати потужність для зв'язку між підключеними пристроями. Приймачі Bluetooth LE тепер можуть відстежувати рівень сигналу і запитувати зміни рівня потужності

передачі в підключених пристроях, як правило, для підтримки оптимального рівня сигналу як з точки зору якості сигналу, так і з точки зору зниження енергоспоживання.

LE Isochronous Channels - функція для підтримки нового стандарту передачі аудіо LE Audio[19], наступного покоління Bluetooth-аудіо. Дозволяє передавати дані з прив'язкою до часу на одне або кілька пристроїв для синхронізованої з часом обробки (приклад: бездротові навушники з роздільними приймачами), а також для паралельної трансляції на необмежену кількість пристроїв.

1.1.3 Технологія UWB

Система UWB позиціонування з'явилася більше 20 років тому, але тільки недавно набула поширення на підприємствах, що вимагають стандартизованого і єдиного бездротового засобу для підключення комп'ютерної техніки[20]. З її допомогою можна вирішувати цілий ряд важливих завдань:

- надійний захист інформації;
- підтримка високої швидкості передачі даних;
- локальне обчислення розташування об'єктів;
- зниження витрат електроенергії.

UWB володіє великим потенціалом, оскільки її інформаційна місткість істотно вище в порівнянні з аналогічними технологіями. Завдяки цьому можна забезпечувати реалізацію більш швидкодіючих бездротових мереж з підвищеною пропускну здатністю.

Термін UltraWideBand перекладається як «надширока смуга». В його основі лежить бездротова технологія зв'язку, яка дозволяє передавати дані на малі відстані при низьких витратах електроенергії. Для UWB характерний широкий радіочастотний діапазон, тому користувачі можуть за короткий час відправляти по бездротовому каналу значний обсяг інформації.

Комп'ютери та периферійні пристрої потребують високошвидкісного інтерфейсу, а застосування Bluetooth і стандарту 802.11 не завжди допомагає

досягти поставлених цілей. Головним мінусом таких протоколів є мала смуга пропускання (в середньому – до 19 Мбіт/сек), що нераціонально для додатків, які вимагають високої швидкості передачі. На відміну від них, UWB краще справляється з функціями швидкої передачі даних і оптимально підходить для бездротового з'єднання комп'ютера та оргтехніки.

Прикладами використання технології є контроль пересування співробітників в офісах, забезпечення безпеки персоналу в галузі логістики та виробничої галузі. Завдяки UltraWideBand можна забезпечити збереження майна підприємств і підвищити рівень охорони праці. Також UWB вважається ключовою технологією в процесі оцифровування виробництва і логістики. Завдяки їй можна легко оцифрувати промислові цехи, склади та технологічні ланцюжки.

У 2020 році технологія зарекомендувала себе для вирішення завдань соціального дистанціювання та контролю за поширенням Covid-19. UWB використовується на пристроях котрі носяться (годинник, бейджи та ін.), які при близькій відстані до іншої людини надсилають повідомлення про необхідність збереження дистанції. Також система дозволяє відстежувати контакти та в разі зараження людини, дозволить легко обчислити тих, хто з ним контактував.

ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ UWB

UWB-сигнали розпізнаються як будь-які сигнали з шириною спектра понад 500 МГц і діапазоном від 3,1 до 10,6 ГГц. Вони досить слабкі (41,5 дБм/МГц), тому не вимагають ліцензування ГКРЧ. Стандарт може використовуватися в різних сферах - від домашнього застосування (для зв'язку комп'ютера зі смартфоном, відеокамерою, сканером та ін.) до медичних і відомчих установ.

До ключових особливостей передачі сигналів на базі UltraWideBand відносять:

- високий захист від перешкод;
- стійкий зв'язок при багатопроменевому поширенні радіохвиль;
- здатність з легкістю проходити крізь перешкоди;
- захист від перехоплення;

- електромагнітна сумісність.

Впровадження технології не вимагає дотримання умови прямої видимості та здійснюється з використанням всього декількох зовнішніх компонентів. UWB є недорогим технічним рішенням, що забезпечує установку трекерів з малою роздільною здатністю до 1 см.

ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ТЕХНОЛОГІЇ UWB

На сьогодні надширокосмугова технологія UWB має великі перспективи розвитку. Передбачається, що вже найближчим часом вона буде активно застосовуватися на масовому ринку і допомагати в реалізації багатьох бізнес-рішень. Причина тому – безліч переваг, які виділяють цю систему на тлі аналогів:

- відсутність обмежень в доступності ВЧ-спектра;
- можливість одночасної підтримки сотень каналів;
- великий діапазон масштабування за критеріями швидкості;
- одноразова робота в якості глобальної, локальної та персональної мережі;
- Глобальна сумісність пристроїв, що застосовують радіочастотний спектр;
- високий захист даних за рахунок потужності сигналів на рівні шуму;
- спектральна гнучкість;
- високоточне визначення місця розташування і відстеження переміщення об'єктів;
- можливість створення окремої комунікаційної мережі, яка буде мирно співіснувати з іншими бездротовими технологіями в офісі.

Технологія має не тільки плюси, але і деякі недоліки. Так, за рахунок широкої смуги та високої потужності надширокосмугові сигнали можуть заважати вже існуючим системам і лініях зв'язку. UWB відрізняється малою тривалістю сигналів. Для їх виявлення можна застосовувати узгоджений фільтр або корелятор, але в такій ситуації буде складно синхронізувати приймання.

Якщо не озиратися на мінуси, можна відзначити, що система UWB є більш перспективною в порівнянні з активним RFID, Wi-Fi та іншими бездротовими

технологіями. Її розвиток в майбутньому обумовлено безпекою, високою швидкістю, точністю передачі даних і можливістю економити на електроенергії.

1.1.4 Wireless USB (WUSB)

Wireless USB - це бездротової USB, тобто стандарт бездротової передачі даних. Він розробляється групою Wireless USB Promoter Group[21].

Wireless USB належать до технологій класу PAN (Personal Area Network). Перш за все, вона призначена для того, щоб здійснювати обмін даними на невеликі відстані. Специфікація декларує пропускну здатність 480 Мбіт / с - на відстані до 3 м, 110 Мбіт / с - на відстані до 10 м. Передача ведеться в безліцензійному діапазоні 2,4 GHz, при цьому створюються для інших бездротових пристроїв перешкоди мінімальні.

Перша версія Wireless USB, яку анонсували у 2005 році, показала саме таку пропускну здатність. А у 2007 році вже вийшли на ринок перші продукти.

У разі виникнення перешкод при зв'язку проблемна частота блокується і пристрої WUSB переходять на інші частоти робочого діапазону.

Робота WUSB-мережі будується навколо зовнішнього (підключається до USB-порту) або вбудованого в комп'ютер передавача, до якого можна під'єднати до 127 бездротових пристроїв. Інші комп'ютери підключаються до мережі аналогічним чином, в периферійні пристрої транслятор WUSB-сигналів також може або вбудовуватися, або підключатися через USB-порт.

Таку технологію досить часто вважають найбільш ймовірним кандидатом на роль основного транспорту для «цифрового дому». Щоб отримати найвищі результати в цій області, була введена розширена підтримка ізохронного трафіку. Це слід вважати одним з основних нововведень щодо провідного USB. В результаті з'явиться можливість забезпечувати якісну передачу потокового аудіо та відео.

У 2010 році завершена специфікація Wireless USB 1.1, яка призведе до підвищення швидкості передачі даних. Вона також передбачає підтримку вищих

частот - до 6 ГГц. Wireless USB 1.1 передбачає підтримку технології Near Field Communication (NFC). Це означає, що настройка та експлуатація Wireless USB-пристроїв стає простіше. При цьому розробники зберегли зворотну сумісність з чинним обладнанням[22].

1.1.5 HomeRF

HomeRF - назва створеної в березні 1998 року групи виробників комп'ютерного та побутового обладнання (Home Radio Frequency Working Group), в яку в перший рік існування увійшло понад 100 фірм, включаючи Intel, Compaq, Ericsson, Hewlett-Packard і Microsoft. Група організувалася для розробки відкритого протоколу розподіленого бездротового доступу SWAP (Shared Wireless Access Protocol), який повинен був лягти в основу радіомережі HomeRF. Згодом специфікацію замість SWAP стали називати на ім'я радіомережі HomeRF. Перша версія специфікації HomeRF було представлено 17 грудня 1998 року, остання (HomeRF 2.01) - 1 липня 2002 року. У січні 2003 року робоча група HomeRF була розформована[23].

Стандарт HomeRF замислювався як бездротова домашня (персональна) мережу, бездротовий аналог відомої на той час провідний Ethernet-подібної мережі HomePNA, яка використала які середовище передачі вже прокладену телефонну лінію. Для нормальної роботи мережі HomeRF необхідний host-комп'ютер або пристрій, що виконує його функції. Останнє сильно знижує вартісну привабливість і зручність розгортання такої мережі.

Необхідність наявності host-комп'ютера є також головною відмінністю цієї технології від Bluetooth. Стандарт HomeRF прекрасно пророблений для вирішення мережевих завдань, в той час, як стандарт Bluetooth не вимагає дорогої апаратної підтримки та крім побудови персональної мережі може бути використаний для вирішення ширшого спектра завдань, в основному зводяться до заміни проводу радіоінтерфейсом. Оскільки ринок такого роду додатків у багато разів перевершує ринок спеціалізованих мережевих пристроїв, Bluetooth і став

першою масовою бездротовою WPAN-технологією. Що ж стосується HomeRF, він поки не знайшов масового застосування. З одного боку, його витісняють Bluetooth-пристрої, з іншого - системи сімейства стандартів IEEE 802.11, які за останні кілька років стали суттєво дешевше (позбавивши тим самим HomeRF основної переваги - низької вартості).

З технічної точки зору технологія HomeRF використовує пакетний спосіб передачі даних за допомогою шумоподібного сигналу по методу частотних стрибків (50 сигналів в секунду). Потужність передавача прийомо передавальної станції становить 100 mW, швидкість обміну даними 1 або 2 Мбіт / с (може бути збільшена до 10 Мбіт / с), передача ведеться на частоті 2,4 GHz. При передачі застосовується двох або чотирирівнева частотна модуляція, кількість пристроїв в мережі - до 127. Захист інформації при передачі здійснюється за алгоритмом Blowfish data security, радіус дії приймач - до 50 м[24]

1.1.6 Технологія інфрачервоного випромінювання (IrDA).

IrDA (Infrared Data Association) – стандарти, котрі окреслюють фізичний та логічний рівні передачі даних із застосуванням діапазону світлових хвиль, як засіб трансляції. Дана технологія є свого роду оптичною лінією зв'язку з малою відстанню дії. Нині вона застосовується в обмеженій сфері діяльності. Дана технологія мала велику популярність під час 20-х років. Але виникнення новітніх протоколів обміну даними витіснило даний стандарт на другий план, тому основна частина виробників відмовились від встановлення модулю у мобільні телефони. Головними причинами відмови від цієї технології є доволі висока складність встановлення у мобільні телефони, обмежений радіус дії при передачі даних (до 2 метрів) та відносно низька швидкість передачі інформації. Проте проблему зі швидкістю з плином часом було врегульовано, але швидкісні модифікації IrDA не набули широкого розповсюдження.

Зазвичай для обміну даними за допомогою IrDA на пристрої встановлюється два датчики світлодіод, для передачі даних, та фотодіод для

прийняття даних, але іноді встановлюється тільки світлодіод або тільки фотодатчик, наприклад телевизор та пульт дистанційного управління. Нині інфрачервоні порти встановлюються не тільки в пульти та телевизори, а також в комп'ютери, мобільні пристрої, та на деякі примірники принтерів та цифрових фотоапаратів. IrDA містить наступні специфікації[25]:

Специфікація фізичного рівня IrPHY (з різновидностями SIR, MIR, FIR, VFIR, UFIR)

Протокольні специфікації:

- IrLAP (Infrared Link Access Protocol) обов'язковий протокол другого рівня, який відповідає каналному рівню мережевої моделі OSI та призначений для контролю доступу, пошуку пристроїв та встановлення зв'язку між пристроями;

- IrLMP (Infrared Link Management Protocol) обов'язковий протокол третього рівня, відповідає мережевому рівню мережевої моделі OSI та відповідає за розподілення потоків даних на різні канали зв'язку, зміну Первинних/Вторинних пристроїв та доступ клієнтських пристроїв до сервісів;

- IrCOMM (Infrared Communications Protocol) призначений для використання ІЧ-з'єднання в якості COM порту, Tiny TP (Tiny Transport Protocol) призначений для передачі великих масивів даних;

- IrOBEX (Infrared Object Exchange) протокол обміну довільними об'єктами (зображення, музика, контакти та ін.);

- IrLAN (Infrared Local Area Network) протокол, який дозволяє встановлення з'єднання з мережею LAN через IrDA- з'єднання;

- IrFM (Infrared Financial Messaging) протокол який дозволяє проводити грошові транзакції. Даний протокол зараз знаходиться у розробці.

Всупереч тому, що ця технологія є застарілою існує багато пристроїв, де використання даної технології залишається вкрай актуальною. Приміром, може буди компанія НПК «Інотекс» котра випускає лічильники, в яких вбудований оптичний модуль IrDA, який застосовується наряду з GSM та цифровим інтерфейсом CAN, для зчитування інформації про енергоспоживання електроенергії та програмування пристрою. Також технологія застосовується для

забезпечення дистанційного керування телевізором за допомогою пульта.

Підсумовуючи можна сказати, що перевагами даної технології є:

- мобільність,
- безпечність передачі даних.

Недоліками даної технології є:

- складність встановлення у пристрій,
- передача даних здійснюється на близькій дистанції між пристроями,
- висока чутливість до перешкод.

1.2 Висновки до розділу 1

В даному розділі було розглянуто історію виникнення бездротових персональних мереж.

Був зроблений розбір групи котра займається визначенням стандартів для бездротових персональних мереж.

Був проведений огляд існуючих технологій WPAN

2 ВИСОКОШВИДКІСНІ ТА НИЗЬКОШВИДКІСНІ МЕРЕЖІ СТАНДАРТІВ IEEE 802.15.3/802.15.4

2.1 Специфікація IEEE 802.15.3

Стандарт IEEE 802.15.3 описує роботу малої БСПІ – пікомережі (piconet). Пікомережа в стандарті IEEE 802.15.3 – це так звана ad-hoc – система, в якій декілька незалежних пристроїв можуть безпосередньо взаємодіяти один з одним. Радіус зони дії одної пікомережі, як правило, не перевищує 10 м.

Основні вимоги до неї – висока швидкість передачі даних, проста інфраструктура, простота встановлення з'єднання і входження в мережу, наявність засобів захисту даних і надання для визначених типів даних з'єднання з гарантованими параметрами передачі (гарантія якості передачі QoS). Швидкість передачі для мереж IEEE 802.15.3 становить $11 \div 55$ Мбіт/с.

Структура

Пікомережа (рис.2.1) може об'єднувати декілька пристроїв, один з яких виконує функції керування (координатор пікомережі – Piconet Coordinator, PNC). Стандарт також передбачає можливість формування так званих дочірніх пікомереж і описує взаємодію між незалежними сусідніми пікомережами.

Обмін даними в мережі

В пікомережі можливий обмін як асинхронними, так і ізохронними (потоківими) даними.

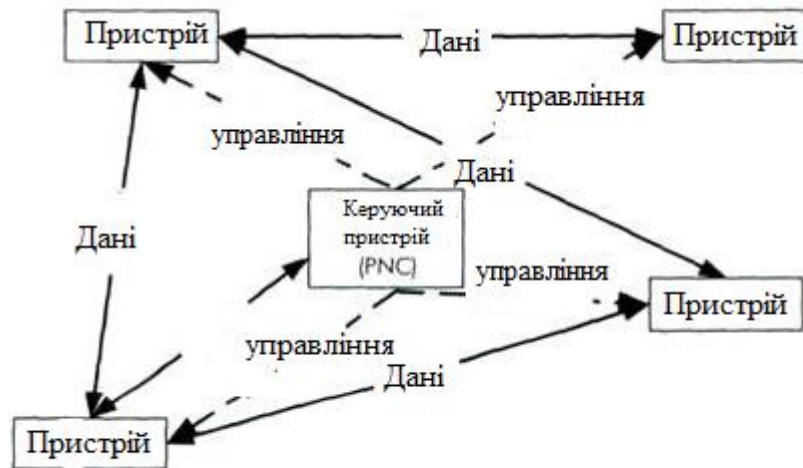
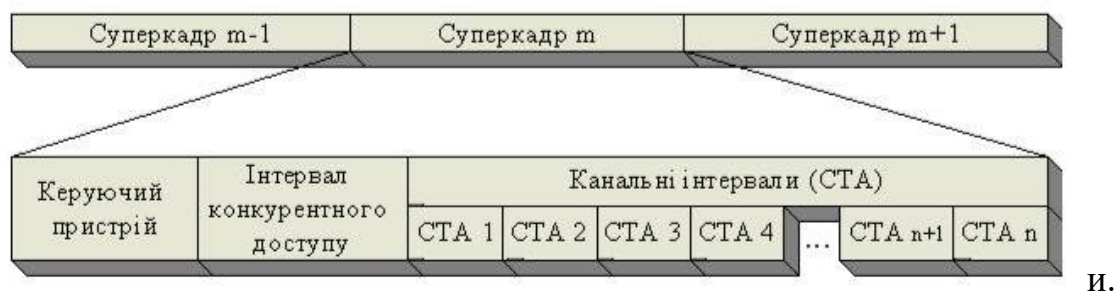


Рисунок 2.1-Структура пікомережі

До останніх відносяться, наприклад, звук і відео. Весь інформаційний обмін в пікомережі базується на використанні послідовності суперкадрів (superframe – термінологія стандартів IEEE 802.15). Кожен суперкадр (рис.2.2) включає керівний сегмент (beacon), інтервал конкурентного доступу (Contention Access Period - CAP) і набір часових інтервалів (каналів), назначених визначеним пристроям. PCN визначає границі всіх інтервалів і розподіляє канали між пристроям



и.

Рисунок 2.2-Структура суперкадру

Під час CAP доступ до каналу надається на основі механізму контролю несучої із запобіганням колізії – CSMA/CA (як і в стандарті IEEE 802.11), тобто

хто перший встиг зайняти канал, той і працює. В цей період передаються команди, або асинхронні дані.

Канальні інтервали (СТА) координатор пікомережі назначає кожному пристрою, або групі пристроїв за попереднім запитом з їхньої сторони. В керуючому сегменті задається момент початку і тривалість кожного СТА.

Призначення каналного інтервалу для будь-якого пристрою означає, що ніхто інший в цей момент не може працювати на передачу. СТА можуть динамічно розподілятися в суперкадрі (для асинхронних та ізохронних даних), або бути фіксованими (тільки для ізохронних даних).

Фізичний канал

Специфікація фізичного каналу в документі IEEE 802.15.3 наведена лише для діапазону 2400-2483,5 МГц. Вона передбачає п'ять допустимих швидкостей передачі (таблиці 2.1). Швидкість 22 Мбіт/с являється базовою, її повинні підтримувати всі пристрої IEEE 802.15.3. При роботі на цій швидкості дані не кодуються. В інших випадках дані перед формуванням модуляційних символів кодуються за допомогою згорткового кодера з трьохзарядним регістром зсуву (так звана модуляція посередництвом решіткового коду з вісьма станами). При цьому в кодері до вихідного набору з 1/3/4/5 біт (при QPSK/16-QAM/32-QAM/64-QAM) додається кодовий біт з виходу трьохрозрядного регістру зсуву.

Таблиця 2.1 Модуляція та швидкість передачі даних в мережах IEEE 802.15.3 в діапазоні 2.4 ГГц

Тип модуляції	Швидкість передачі даних, Мбіт/с
QPSK	11
DQPSK	22
16-QAM	33
32-QAM	44
64-QAM	55

Стандарт IEEE 802.15.3 вимагає, щоб пристрої могли працювати в будь-якому із п'яти можливих частотних каналів (таблиця 2.2). Причому, передбачається два каналних плани – режим високої густини (чотири канали в допустимому діапазоні) і режим сумісності з мережею стандарту IEEE 802.11b (три дозволених канали). Це означає, що кожен пристрій перед початком роботи сканує діапазон, знаходить вільні канали, визначає наявність робочої мережі IEEE 802.11b.

Таблиця 2.2 Розподіл каналів в мережах IEEE 802.15.3

Номер каналу	Центральна частота, МГц	Режим високої щільності	Режим сумісності з IEEE 802.11b
1	2412	+	+
2	2428	+	
3	2437		+
4	2445	+	
5	2462	+	+

2.1.1 Специфікація IEEE 802.15.3a

Досягнути високих швидкостей в даному стандарті можна тільки збільшуючи спектральну ширину каналу, переходячи в область так званого широкосмугового зв'язку (UWB). В США це стало можливим після 14 лютого 2002 року, коли федеральна комісія зв'язку (FCC) США дозволили використання надширокосмугових пристроїв всередині приміщень в діапазоні 3100÷10600 МГц при максимальній густині потужності випромінювання $7,41 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц (- 41,3 дБп/МГц).

В результаті в 2002 році утворилась дослідницька група Tg3a, в яку увійшли представники практично всіх найбільших напівпровідникових і телекомунікаційних фірм. Згодом з'явилися дві конкурентні пропозиції щодо

технології НШС-передачі – на основі ортогональних кодів (так званий мультисмуговий множинний доступ з використанням ортогональних несучих, MB-OFDM) і шляхом розширення спектру сигналу методом прямої послідовності (DS-UWB). Першу пропозицію підтримувало більшість фірм на чолі з гігантами Texas Instruments і Intel (в березні 2003 року було створено навіть спеціальне об'єднання MBOA – Multiband OFDM Alliance). Групу прихильників другої пропозиції очолили компанії Motorola і XtremeSpectrum.

Згідно з прийнятими в комітеті IEEE 802 правил, для того, щоб затвердити стандарт, за запропонований варіант повинні проголосувати не менше 75% членів робочої групи. Однак, попри чисельну перевагу прихильників MB-OFDM, а в MBOA входить 170 компаній, серед яких 9 із 10 найбільших напівпровідникових компаній (крім TSMC) на попередніх голосуваннях їм не вдалось набрати необхідні 75% голосів від загального числа компаній, працюючих над 802.15.3a. Причин тут декілька. Можливо, одна із основних пов'язана із технологією MB-OFDM.

Суть її полягає в тому, що весь дозволений діапазон ділиться на смуги шириною 528 МГц. В стандартному режимі передбачено три смуги, в розширеному – сім (рис. 13.12). Кожна смуга, в свою чергу, ділиться на 128 піднесучих частот з кроком 4,125 МГц. З них використовується 122: 100 для модуляції даних, 12 піднесучих – пілотні і ще 10 – захисні. Кожна піднесуча модулюється з використанням QPSK. Один OFDM-символ включає 100, або 200 кодованих біт (100 у випадку, коли однаково модулюються дві під несучі, симетричні відносно центральної). Період передачі символів – 312,5 нс. Вище викладене стосується звичайної OFDM. Мультисмуговість означає, що наступний символ може передаватися в іншій частотній смузі по жорстко визначеній схемі для кожного логічного каналу.

Послідовність переходу з однієї смуги частот на іншу називають частотно - часовим кодом. Поки передбачено чотири таких коди (канали).

Крім переходу з частоти на частоту, передбачений режим, коли один символ може передаватися декілька разів (два, або чотири). Наприклад, код 1-2- 3-1-2-3

означає, що перший OFDM-символ передається в смугах 1 і 2, другий OFDM-символ – в смугах 3 і 1, третій – в смугах 2 і 3.

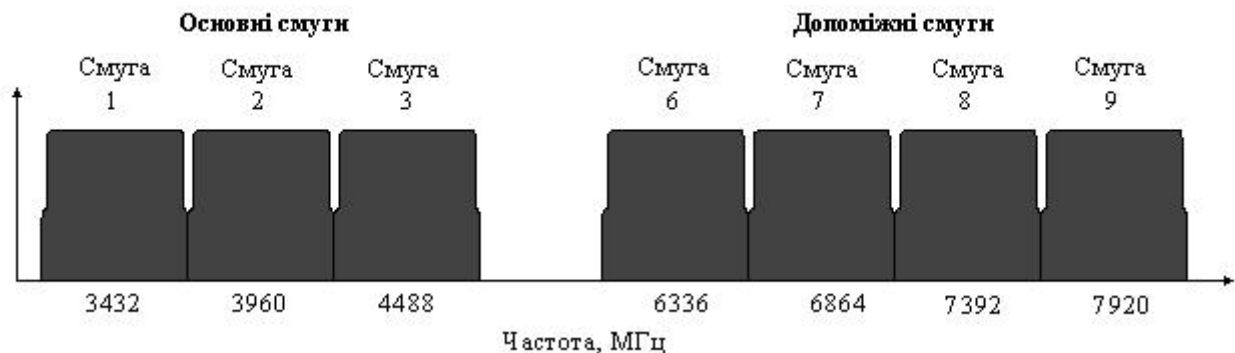


Рисунок 2.3- Розподіл каналів в стандарті IEEE 802.15.3a

Обмін інформацією відбувається кадрами (пакетами). Кадр складається із преамбули (набору синхронізуючих послідовностей), заголовку (керуюча інформація) і поля даних. Преамбула і заголовок завжди транслюються з найменшою із можливих швидкостей – 55 Мбіт/с. Чотири логічних канали вказують на те, що в безпосередній близькості можуть працювати в крайньому разі чотири пікомережі. Для цього кожному логічному каналу відповідає унікальний вигляд синхропослідовності в преамбулі.

Таблиця 2.3 Частотно-часові коди

Номер логічного каналу	Режим трьох смуг	Режим семи смуг
1	1-2-3-1-2-3	1-2-3-4-5-6-7
2	1-3-2-1-3-2	1-7-6-5-4-3-2
3	1-1-2-2-3-3	1-4-7-3-6-2-5
4	1-1-3-3-2-2	1-3-5-7-2-4-6

Таким чином пропонується комбінація OFDM і відомого механізму частотних стрибків (FH). В результаті, залежно від швидкості кодування і числа

повторів символів формується спектр швидкостей від 55 до 480 Мбіт/с.

Змінюючи вид модуляції, можна досягнути і більших швидкостей. Так, використання 16-QAM при цій же схемі кодування дасть вже $480 \cdot 2 = 960$ Мбіт/с. Інший спосіб роботи полягає у використанні для передачі одночасно трьох діапазонів – тоді при QPSK і швидкості кодування $3/4$ досягається швидкість $480 \cdot 3 = 1440$ Мбіт/с. Проблема в тому, що метод частотних стрибків – не найефективніший з точки зору використання спектрального діапазону.

Опоненти MB-OFDM вказують, що прихильники цієї технології в своїх вимірюваннях середньої потужності випромінювання передавача усереднюють її по часовому інтервалі порядку 1 мс. Цей час відповідає довжині трьох символів. Реально ж при використанні механізму повторів (і при вимірюванні) символ в одному субканалі передається лише один раз. В результаті густина потужності випромінювання при роботі передавача може перевищувати допустиму (Федеральною комісією зв'язку США) норму – 41,3 дБп/МГц. А це вже серйозна проблема, оскільки мова іде про сигнал зі смугою вище 500 МГц.

Прихильники технології DS-UWB пропонують для розширення спектру класичний метод прямої послідовності. При цьому кожен біт замінюється спеціальною кодовою послідовністю довжиною до 24 біт. Передбачено два види модуляції – двійкова фазова BPSK (один біт на символ) і так звана QPSK-модуляція (модуляція на основі чотирьох ортогональних двійкових кодів).

QPSK – фактично варіант квадратурної модуляції, один QPSK-символ містить два біти. Весь діапазон мовлення розбитий на дві зони: $3,1 \div 4,85$ ГГц (нижній діапазон) і $6,9 \div 9,7$ ГГц (верхній діапазон). В кожному діапазоні передбачено шість каналів пікомережі (з кроком 39 МГц в нижньому діапазоні починаючи з 3,9 ГГц і з кроком 78 МГц – у верхньому починаючи з 7,8 ГГц). Лише чотири канали нижнього діапазону з центральними частотами 3939, 3978, 4017 і 4056 МГц вважаються обов'язковими для підтримки кожним пристроєм, інші канали – додаткові. Частота передачі модуляційних символів в кожному каналі рівна $1/3$ його центральної частоти. В залежності від швидкості попереднього кодування, виду модуляції і довжини кодової послідовності

швидкість передачі даних може складати 28, 55, 110, 220, 500, 660, 1000 і 1320 МБіт/с.

Відмітимо, що дебати прихильників двох підходів щодо реалізації НШС-пікомереж тривають з 2003 року. Виробники великих інтегральних мікросхем готові розпочати випуск необхідних компонентів (а деякі вже почали) і ситуація повинна найближчим часом вирішитись. Тим більше, що вже з'являються пропозиції, об'єднати ці дві технології і без особливих витрат виготовляти двохмодові пристрої, які підтримуватимуть MB-OFDM і DS-UWB.

Недавно з'явилися перші чіпсети стандарту IEEE 802.15.3. Так Freescale Semiconductor, дочірня компанія фірми Motorola, випустила чіпсет XS110 з трьох мікросхем – трансівера з ВЧ-трактом, baseband-процесора (комунікаційний процесор, який виконує всі перетворення фізичного рівня, включаючи ЦАП/АЦП) і MAC-контролера. Максимальна швидкість, яка забезпечується модемом на основі цього чіп сету – 114 МБіт/с (тобто мова йде про версії стандарту на основі технології DS-UWB). Енергія, яку використовує чіпсет 750 мВт, напруга живлення – 3,3 В. Загальна потужність випромінювання в смузі частот 3,1÷10,6 ГГц – менше 1 мВт. Мікросхеми виготовлені на основі 0,18 мкм КМОП- і SiGe-технології.

2.1.2 Специфікація IEEE 802.15.3b-2006

Поправка до IEEE 802.15.3b-2005 була опублікована 5 травня 2006 р. Вона вдосконалила 802.15.3 для покращення впровадження та сумісності MAC. Ця поправка включає багато оптимізацій, виправлені помилки, уточнені неясності та додані редакційні роз'яснення, зберігаючи зворотну сумісність. Серед інших змін поправка визначила такі нові особливості:[8]

- новий об'єкт управління рівня MAC (MLME) точка доступу до послуги (SAP);
- мається на увазі політика підтвердження, яка дозволяє проводити опитування;

- управління логічним посиланням/протокол доступу до підмережі (LLC / SNAP) заголовки;
- багатоадресна передача присвоєння адреси;
- численні періоди суперечок у суперславі;
- спосіб передачі часу каналу іншому пристрою в ПАН;
- швидше відновлення мережі у випадку, коли координатор пікомережі (PNC) різко відключається;
- спосіб для пристрою повернути інформацію про якість сигналу прийнятого пакету.

2.1.3 Специфікація IEEE 802.15.3с-2009

IEEE 802.15.3с-2009 був опублікований 11 вересня 2009 р. Група завдань TG3с розробила альтернативний фізичний рівень на основі міліметрів хвиль (PHY) для існуючого стандарту 802.15.3 Бездротова персональна мережа (WPAN) 802.15.3-2003 . Група завдань IEEE 802.15.3 3с (TG3с) була сформована в березні 2005 року. Цей WWAN mmWave визначений для роботи в діапазоні 57–66 ГГц. Залежно від географічного регіону доступна смуга пропускання від 2 до 9 ГГц (наприклад, 57–64 ГГц доступна як неліцензована смуга, визначена FCC 47 CFR 15.255 у Північній Америці). WPAN з міліметровими хвилями дозволяє забезпечити дуже високу швидкість передачі даних, малий діапазон (10 м) для додатків, включаючи високошвидкісний доступ до Інтернету, завантаження потокового вмісту (відео на вимогу, HDTV, домашній кінотеатр тощо), потокове передавання даних у реальному часі та бездротову шину передачі даних для заміна кабелю. Загалом у режимі було визначено три режими PHY:[9]

- Режим однієї несучої (SC) (до 5,3 Гбіт / с);
- Режим високошвидкісного інтерфейсу (HSI) (одна несуча, до 5 Гбіт / с);
- Аудіо / візуальний (AV) режим (OFDM, до 3,8 Гбіт / с).

2.2. Низькошвидкісні мережі стандарту IEEE 802.15.4 (ZIGBEE)

На даний момент у світі існує більше десятка різних стандартів безпроводного зв'язку. Кожен стандарт безпроводного зв'язку призначений для виконання певного кола завдань, має свої недоліки та переваги. Серед основних завдань, які намагалися вирішити розробники згаданих стандартів було обслуговування великої кількості абонентів, збільшення швидкості передачі даних та ін. Сучасні системи зв'язку розроблені для задоволення потреб телефонії, мультимедіа, надання доступу до Інтернет та інших високошвидкісних послуг. Але для промислових, або домашніх потреб достатньо мати систему передачі даних, яка повинна обслуговувати невелику територію та забезпечувати швидкість $1 \div 32$ Кбіт. Такої швидкості достатньо для прийому даних від різних давачів, сенсорів, побутових пристроїв, обміну даними між вузлами в персональній мережі. Також є ряд пристроїв з якими відбувається обмін інформацією і вони працюють від автономного живлення.

Тому була розпочата робота над створенням стандарту зв'язку з невеликими швидкостями передачі, малим радіусом дії та підтримання пристроїв з малим енергоспоживанням.

ZigBee є назвою стандарту, який був розроблений для забезпечення надійної низькошвидкісної передачі даних на відносно невеликій відстані з дешевим обладнанням. Назва походить від двох англійських слів zigzag (зигзагоподібна траєкторія), bee (бджола), тобто робота технології ZigBee є подібною до способу обміну інформацією між бджолами який був взятий як аналогія для неї.

Стандарт дозволяє вирішувати як прості завдання наприклад, відкриття дверей гаражу, так і більш складніші. Крім цього технологію ZigBee можна використовувати для створення мережі передачі повідомлень. Завдяки продажу великої кількості чіпів та програмного забезпечення можна досягти меншої вартості та простоти вирішення різних завдань.

Призначення стандарту ZigBee

ZigBee можна вважати надбудовою стандарту IEEE 802.15.4, який визначає фізичний та MAC рівні. Сам стандарт ZigBee визначає специфікації рівня застосувань та рівня безпеки, забезпечуючи сумісність між продукцією різних виробників.

Технологія ZigBee призначена для використання в системах збору даних та управління. Ця технологія забезпечує мале енергоспоживання, володіє хорошою надійністю передачі даних та захистом інформації, сумісна з пристроями різних виробників. ZigBee-пристрої можуть застосовуватися в різних областях. Наприклад, для промисловості - в системах збору даних і управління технологічним устаткуванням, для передачі інформації від рухомих об'єктів, об'єктів, що знаходяться під високою напругою та ін. В комунальному господарстві та інженерних будівлях бездротові пристрої ZigBee застосовуються для управління теплопостачанням, освітленням, кондиціонуванням і вентиляцією, в системах пожежної безпеки, автоматичного пожежегасіння та ін.

Також, стандарт ZigBee використовується для створення персональних безпроводних мереж (WPANs). В останні роки активно починає розвиватися ідея цифрового дому, який містить різні пристрої керування. Ідея полягає у створенні повністю автоматизованої системи, яка дозволить надати безпеку жителям дому та надавати їм повне керування. Технологія ZigBee дозволяє втілити цю ідею в реальність.

Таблиця 2.4 Основні параметри радіоінтерфейсу стандарту IEEE 802.15.4

Смуга частот	Кількість каналів	Чіпова швидкість	Бітова швидкість	Модуляція	Розширення спектру
868÷870 МГц	1	300 Кчп/с	20 Кбіт/с	BPSK	DSSS/15
902÷928 МГц	10	600 Кчп/с	40 Кбіт/с	BPSK	DSSS/15
2.4÷2.4835 ГГц	16	2 Мчп/с	250 Кбіт/с	O-QPSK	DSSS/32

Альянс ZigBee

ZigBee організований в межах альянсу ZigBee створеного в 2002 р. (ZigBee Alliance). Метою альянсу є об'єднання зусиль в розробці найбільш ефективних протоколів і забезпечення сумісності пристроїв різних виробників. Багато компаній (більше 150) вже використовують цю технологію, для вирішення своїх цілей, а кілька компаній є керівниками альянсу. Фактично вони є -покровителями стандарту ZigBee. Цими компаніями є: Chipcon, Ember, Freescale, Honeywell, Mitsubishi, Motorola, Philips та Samsung.

З'явилася перша версія стандарту ZigBee 1.0 з описом профілю стека НС (Home Control, який передбачав використання мережі з топологією "дерево") та профілю додатку HCL (Home Control Lighting) для управління освітлювальним устаткуванням у грудні 2004 р. Ведеться робота над розробкою та затвердженням профілів пристроїв різних побутових застосувань: вимикачів освітлення, лічильників та ін.

Вже зараз розглядаються питаннях синхронізації, боротьби з перешкодами і вдосконалення механізмів захисту інформації в безпроводній мережі.

Принцип роботи

Призначення рівнів моделі ZigBee:

Фізичний рівень та MAC рівень повністю використовують переваги радіоінтерфейсу, визначеного в стандарті IEEE 802.15.4. Стандарт 802.15.4 описує роботу радіоінтерфейсу в мережі з рівноправними вузлами. Для розширення спектру сигналів використовується технологія розширення спектру методом прямої послідовності (англ. Direct Sequence Spread Spectrum DSSS). Завдяки використанню технології DSSS спрощується реалізація обладнання ZigBee. Для каналів, які розташовані в області частот 1 ГГц використовуються послідовності довжиною 15 чіпів, а для каналів розташованих в області 2.4 ГГц - 32 чіпи. MAC рівень не містить великої кількості примітивів, а структура кадру із змінною частиною дозволяє пристосовуватися для вирішення різних задач та працювати з різними топологіями мережі. Забезпечена підтримка 128-бітового AES-шифрування. Також стандарт IEEE 802.15.4 встановлює швидкості передачі

даних, напрям, та методи модуляції, які будуть використовуватися.

Альянс ZigBee конкретизує логічну мережу, безпеку та прикладне програмне забезпечення, яке реалізується в мікропрограмному стеці. Кожна комбінація мікроконтролер/RF чіп вимагає свій власний стек. ZigBee через відмінності між мікроконтролерами та RF чіпам. Зазвичай, стек ZigBee включається в мікроконтролер, або RF чіп. Стек, може належати виробнику чіпів, надаватися продавцем чіпів від третьої сторони, або надаватися третьою стороною для специфічної комбінації мікроконтролер/RF чіп.

Прикладний рівень визначається профілями, яких є два типи: загальні профілі - затверджені альянсом ZigBee для цілей сумісності та приватні профілі для використання в окремих замкнених системах.

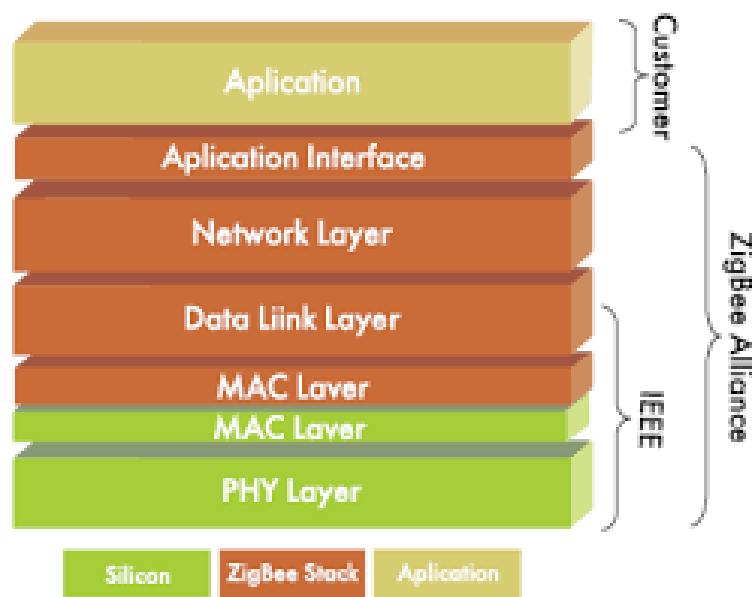


Рисунок 2.4-Рівні моделі ZigBee

Таким чином вузол мережі ZigBee повинен містити RF чіп (трансівер який працює на певній частоті та відповідає стандарту IEEE 802.15.4) і мікроконтролер який реалізує набір протоколів для обміну даними.



Рисунок 2.5-Склад платформи ZigBee з профілем ZigBee

Компанія Chipcon виготовляє ряд RF чіпів для частоти 2.4 ГГц, а Texas Instruments мікроконтролери з низьким споживанням енергії.

Спектр частот технології ZigBee

В діапазоні 2.4 ГГц (16 каналів зв'язку з кроком 5 МГц) згідно стандарт ZigBee передача даних відбувається з швидкістю 250 Кбіт/с. Для частот 868 МГц (1 канал) та 902÷928 МГц (10 каналів з кроком 2 МГц) швидкість передачі даних складає 20 Кбіт/с та 40 Кбіт/с відповідно

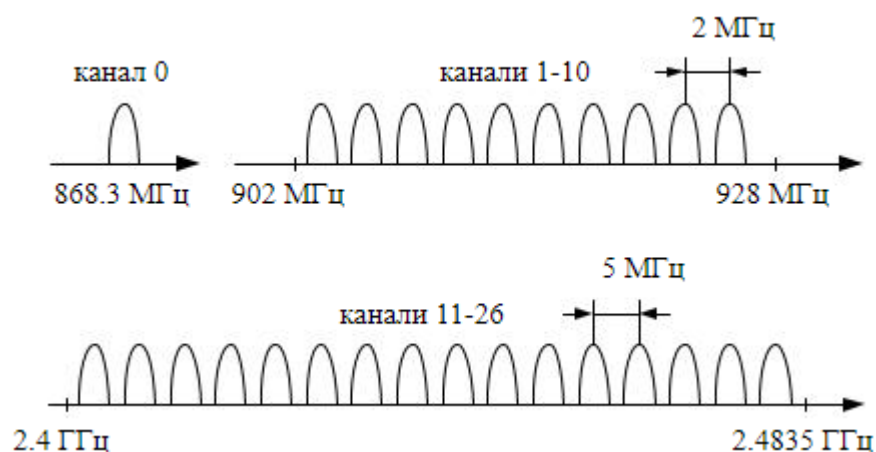


Рисунок 2.6-Розподіл каналів зв'язку згідно стандарту IEEE 802.15.4

Передбачається, що найбільше буде використовуватися діапазон 2.4 ГГц,

оскільки в Європі на частоті 868 МГц доступний лише 1 канал, а діапазон 915 МГц дозволений в США, Канаді, Кореї та Австралії.

Структура та топологія мережі ZigBee

Мережа ZigBee складається із кількох компонентів. Найбільш простим є кінцевий пристрій. Пристрій може бути повнофункціональним (full function device - FFD), або обмеженим (reduced function device - RFD). Мережа повинна містити мінімум один FFD пристрій, який працює як координатор мережі.

Структура мережі ZigBee:

- координатор PAN (FFD пристрій) - утворює мережу та підтримує таблиці маршрутизації;
- маршрутизатор (FFD пристрій) - обмінюється інформацією з іншими маршрутизаторами та координаторами для зменшення функцій кінцевих пристроїв;
- кінцеві пристрої (RFD пристрій) - довільні пристрої стандарту IEEE
- 802.15.4 призначені для виконання різних завдань, RFD може обмінюватися інформацією тільки з FFD пристроєм.

Є три топології мереж ZigBee:

Топологія зірка. При використанні такої топології всі вузли мережі приєднуються до центрального, який називається координатором PAN. Обмін інформацією відбувається тільки через координатора PAN. Координатор PAN зазвичай має централізоване живлення, тоді як решта вузлів мають автономне живлення. Таку топологію краще використовувати для домашніх мереж, периферійних пристроїв PC ін.

В сітковій (одноранговій) топології також наявний координатор PAN, але кінцеві пристрої можуть обмінюватися інформацією між собою без допомоги координатора. Така топологія забезпечує високу надійність роботи мережі завдяки передачі інформації між будь-якими пристроями та може використовуватися для промислових мереж, мереж сенсорів ін.

Деревоподібна топологія представляє собою синтез зіркової та сіткоподібної топологій і поєднує їхні переваги. Пристрої FFD — утворюють

дерево, пристрої RFD розташовані як листочки на ньому. Мережа може містити декілька координаторів, які забезпечують послуги синхронізації, але тільки один координатор здійснює керування всією мережею.

Обмін інформацією в мережі відбувається за допомогою суперфреймів. В загальному випадку фрейм містить керуючий інтервал (beacon), інтервал конкурентного доступу (CAP) відповідно до механізму CSMA/CA і період доступу.

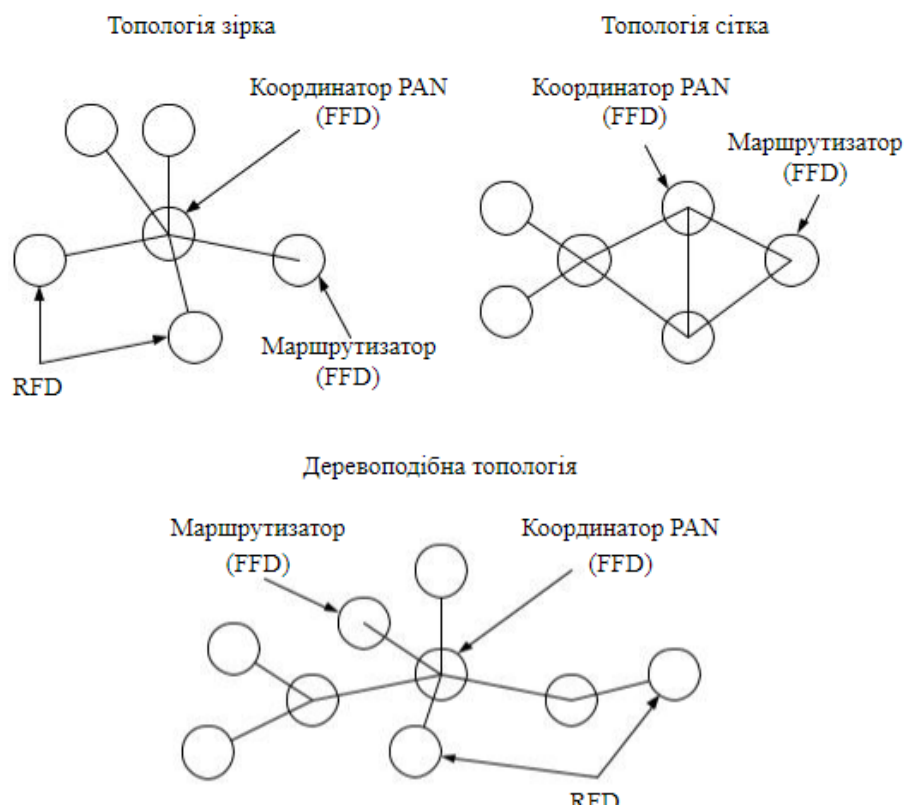


Рисунок 2.7-Топології мереж ZigBee

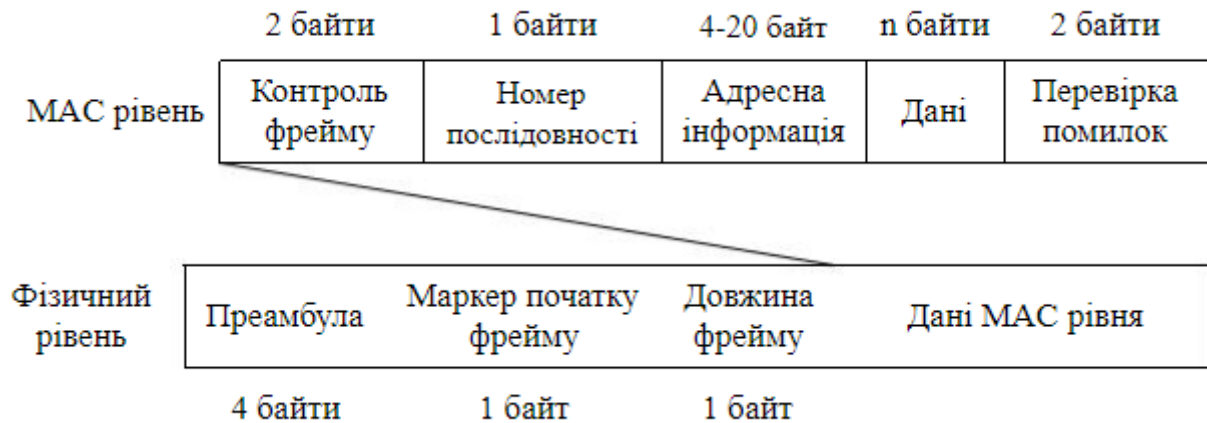


Рисунок 2.8-Структура фрейму даних

Останній містить набір часових інтервалів призначених певним пристроям для передачі даних. Керуючий інтервал передає тільки координатор PAN.

Кожен пристрій в мережі передає дані за допомогою фреймів. Вони можуть бути чотирьох типів – керуючі (beacon frame), фрейми даних, фрейм підтвердження прийому та фрейми команд рівня MAC.



Рисунок 2.9-Структура фрейму підтвердження

Завдяки вбудованому програмному забезпеченню пристрої при включенні живлення можуть самі "знаходити" один одного. У випадку виходу з ладу якого-небудь приладу вони здатні "розшукати" нові маршрути для передачі повідомлень.

Споживання енергії

Щоб мінімізувати споживання енергії та забезпечити тривалу роботу від автономного живлення кінцеві пристрої можуть більшість часу знаходитися в режимі очікування, а за необхідності переходити в активний режим роботи.

Стандарт ZigBee передбачає, що маршрутизатори та координатор будуть мати централізоване живлення. Крім таких режимів роботи в технології ZigBee можуть використовуватися трансівери і мікоконтролери з низьким споживанням енергії. Наприклад, трансівер CC2420 Chipcon під час прийому споживає 18.8 мА, а під час передачі – 17.4 мА.

Типові часові затримки складають 30 мс для підключення нового пристрою до мережі, 15 мс для переходу із режиму очікування в активний режим, 15 мс для доступу до каналу. В результаті, затримки відгуку настільки малі, що людина, увійшовши до кімнати і клацнувши перемикачем безпроводного зв'язку ZigBee, навіть не помітить, що світло з'явилося майже миттєво, тоді як затримки при підключенні пристроїв до мережі Bluetooth складає біля 3 с.

Переваги технології ZigBee

Низька вартість. Типове обладнання ZigBee є дешевим. Ціна обладнання може бути меншою за \$12, якщо умови придбання 100 штук (оскільки 802.15.4 і стеки ZigBee зазвичай входять в цю вартість, кристали і інших дискретних компоненти відсутні). Такі ціни забезпечують економічний вигравш застосування ZigBee.

Стійкість мережі ZigBee. Якщо дві точки мережі не можуть обмінюватися інформацією відбувається динамічна передача повідомлень від несправного вузла до маршрутизатора, якому відомий інший шлях передачі даних до місця призначення. Здійснюється така процедура автоматично, що дозволяє вузлам мережі продовжувати працювати.

Використання дешевих маршрутизаторів може також розширити розміри мережі, якщо відстань між базовою станцією і видаленим вузлом перевищує радіус дії пристрою.

Підтримка великої кількості застосувань. Оскільки стандарт ZigBee є відкритим, надається можливість самостійного вибору продукції різних

виробників. Групи альянсу ZigBee визначають профілі сумісності, яких повинні дотримуватися ZigBee пристрої, а радіоінтерфейс взаємодітиме з будь-яким іншим радіоінтерфейсом, за дотримання того ж профілю.

Низьке споживання енергії. Обладнання ZigBee може працювати з потужністю 1 мВт, переходити в режим очікування, що забезпечує довгий строк роботи від автономного живлення.

2.2 Висновки до розділу 2

У даному розділі проведений детальний опис стандартів IEEE 802.15.3. А саме розглянуто структура мережі, те як проходить обмін даних в ній, а також фізичний рівень.

Також у даному розділі проведений огляд архітектури протоколу ZigBee. Досліджено рівні стеку протоколу (фізичного рівня PHY, рівня доступу до середовища MAC, мережевого рівня NWK та прикладного рівня APL).

Показано як узгоджена взаємодія цих рівнів (модуляція та демодуляція радіосигналів, взаємодія двох окремо взятих приймача та передавача, маршрутизація повідомлень) забезпечує повноцінне функціонування мережі ZigBee

3 ПРИНЦИПИ СИНХРОНІЗАЦІЇ ВИСОКО ТА НИЗЬКОШВИДКІСНИХ СТАНДАРТІВ 802.15.3(4)

3.1 Вимоги синхронізації в IEEE 802.15.3

Існує два підходи до управління мережею на MAC-рівні: централізований та розподілений. Яскравим прикладом централізованого підходу є протокол IEEE 802.15.3. У даній мережі керуванням мережею займається – координатор мережі. Координатор гарантує синхронну роботу всіх пристроїв в пікомережі, приймає рішення про вибір робочої частоти, потужності сигналу при передачі даних, довжини суперкадра, а також управляє доступом пристроїв до каналу, тобто розділяє тимчасові ресурси пікомережі між пристроями. Беручи до уваги це все стає зрозуміло, що координатор є найбільш вразливим пристроєм даної мережі. Його нестабільність суттєво.

Для підвищення надійності та поліпшення підтримки мобільності пристроїв, був розроблений протокол MAC-рівня мереж з розподіленим управлінням, принципом цього протоколу є те, що всі пристрої в мережі рівноправні і виконують однакові функції, підкоряючись одним і тим же правилам роботи. Даний протокол розробив WiMedia Alliance.

У мережах з розподіленим управлінням на MAC-рівні кожен пристрій має своє бачення топології мережі, завантаженості каналу, конфліктів між пристроями, інтерференції з сусідніми мережами та ін. Пристрої обмінюються цією інформацією про мережу один з одним, синхронізуючи тим самим роботу мережі. Для цього пристрою регулярно розсилають спеціальні кадри "бікон".

«Кожен пристрій регулярно посилає свій бікон і "слухає" бікони інших пристроїв, щоб зафіксувати їх присутність і передачу даних в мережі, а також отримати інформацію про мережу з точки зору сусідніх пристроїв. Приклад топології мережі наведено на Рис.3.1, де цифрами показані положення пристроїв, а колами – відповідні їм області впевненого радіоприйому («чутності») пристрою в центрі кола. Передбачається, що якщо сусідній пристрій знаходиться в області чутності, кадри цього пристрою можуть бути отримані без помилок. Цю область

також називають TX-областю (від англ. transmit-передавати)»[27].

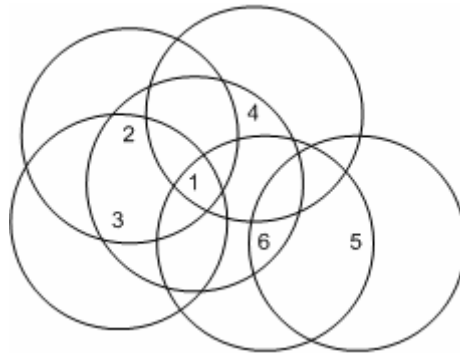


Рисунок 3.1- Топологія мережі зі складною структурою

«Область, в якій пристрій "чує", що сусідній пристрій передає кадр, але не може декодувати його без помилок через слабкість сигналу, називають CS-областю (від англ. carrier sense-контроль несучої). Розмір цієї області залежить від багатьох параметрів. Обчислення співвідношення розмірів TX - і CS-областей є досить складним завданням. Базовою часовою одиницею пікомережі WiMedia є суперкадр, структура якого показана на Рис.3.2. Щоб уникнути фрагментації суперкадра, бікони всіх пристроїв згруповані на його початку - в часовому інтервалі, який називають бікон-періодом.»[27]

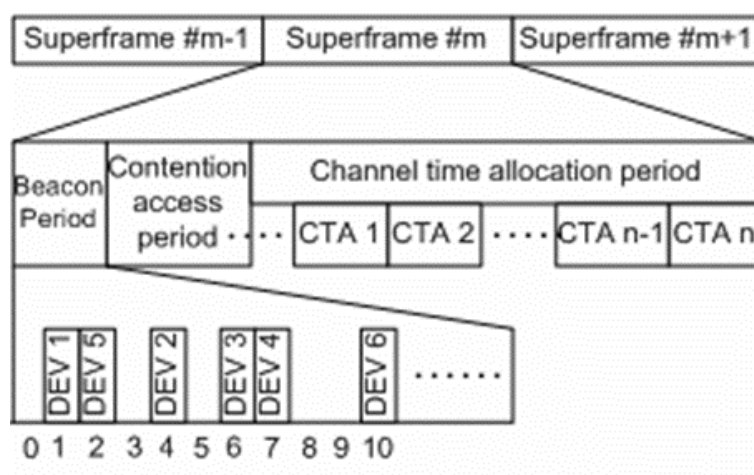


Рисунок 3.2 - Структура суперкадра пікомережі стандарту WiMedia

Бікон кожного пристрою займає окремий часовий слот- бікон-слот. Розмір

бікон-періоду залежить від кількості пристроїв в мережі, але не перевищує максимального додаткового розміру MaxBP (Maximum Beacon Period), визначеного в специфікації WiMedia.

Для отримання інформації від сусідніх пристроїв пристрої сканують бікон-період, тобто прослуховують всі бікон-слоти від першого до останнього зайнятого бікон-слота (слот номер 10 на Рис.3.2). Чим довший бікон-період, тим більше слотів необхідно прослуховувати за кожен супер - кадр. Щоб зменшити споживання енергії, бікон-період повинен бути стиснутий до мінімального розміру. Для цього потрібно розташувати бікони пристроїв так, щоб вони займали послідовні слоти, без пропусків, починаючи з першого слота.

Але згідно специфікації WiMedia, декілька перших слотів, починаючи з нульового слота, зарезервовані для службових цілей. Кількість таких слотів фіксована. У роботі [27], даний факт опускається для простоти опису та вважається, що пристрої можуть розташувати свій бікон у будь - якому незайнятому бікон-слоті, включаючи наймолодший слот.

Якщо бікони декількох пристроїв опиняються в одному і тому ж бікон-слоті, то в цьому випадку говориться про колізію біконів, а сам бікон слот називають колізійним. Колізія біконів може виникнути, наприклад, через неточності годин пристроїв в мережі. Помилка годинника накопичується, що в остаточному результаті призводить до перекриття різних пристроїв в часі.

Оскільки керуюча інформація в мережі передається за допомогою біконів, то пристрої, чиї бікони опинилися в колізії, не можуть продовжувати нормальну роботу до тих пір, поки не виявлять і не позбавляться від колізії. Для якнайшвидшого виявлення колізії пристрої використовують інформацію, отриману від сусідніх пристроїв.

Розглядаються два пристрої А і В, кожне з них посилає свій бікон. Пристрій А, отримавши бікон від В, намагається знайти свій ідентифікатор у відповідному полі отриманого бікона. Якщо ідентифікатор знайдений, значить, у попередньому суперкадрі пристрій отримав бікон від А. У разі, якщо в попередньому суперкадрі пристрій В не отримало бікон від А, відповідне поле бікона В буде заповнено

нулями. У разі ж, якщо в попередньому суперкадрі пристрій В замість бікона від А зафіксував спотворений кадр або просто шум – можливо, колізію – у відповідному полі бікона В буде стояти спеціальний ідентифікатор 0xFFFF. Отримавши від В попередження про те, що в бікон-слоті пристрою А, можливо, трапилася колізія, пристрій А повинен змінити Бікон-слот [27].

Однак бездротовий канал зв'язку ненадійний, і пристрій В могло просто не зуміти декодувати бікон від пристрою А із-за випадкових завад в радіоканалі, і помилково просигналізувати про колізії в бікон-слоті пристрою А. Щоб знизити ймовірність помилкової тривоги, пристрій А має отримати від одного і того ж пристрою В поспіль U бікон, що сигналізують про колізію, щоб прийняти остаточне рішення про зміну бікон-слота. Таким чином, якщо протягом U суперкадрів поспіль пристрій отримує сигнали про бікон-колізію, воно, згідно WiMedia, вибирає новий бікон-слот випадковим чином серед усіх незайнятих бікон-слотів після останнього зайнятого. За допомогою цієї схеми випадкового вибору нового бікон-слота забезпечується досить висока ймовірність того, що в разі одночасного вибору нового бікон-слота декількома пристроями вони не виберуть один і той же бікон-слот і не потраплять в нові бікон-колізії. Наступні бікон пристрій посилає в новий, обраний випадково, бікон-слот.

Безпосередньо після включення пристрою сканують весь бікон-період в пошуках незайнятих бікон-слотів. Щоб приєднатися до пікомережі, пристрій повинен вибрати бікон-слот випадковим чином серед усіх незайнятих бікон-слотів після останнього зайнятого. Таким чином використовується та ж схема випадкового вибору бікон-слота, що і при вирішенні бікон-колізії, що забезпечує досить високу ймовірність правильного вибору в разі одночасного включення декількох пристроїв.

Однак при такій схемі випадкового вибору бікон-слота після приєднання (або дозволу колізій) пристроїв до мережі їх бікони розташовані в бікон-періоді випадковим чином від першого бікон-слота до останнього – слота з номером MaxBP. Як уже згадувалося вище, для скорочення споживання енергії, розмір бікон-періоду повинен бути зменшений до мінімуму. Для цього пристрою

зрушують свої бікони в перші бікон-слоти, якщо це можливо. Згідно з специфікацією WiMedia тільки пристрій в останньому зайнятому бікон-слоті може зрушити свій бікон в перший вільний слот. Це правило виключає одночасний зсув біконів декількома пристроями в один і той же слот. Щоб переконатися, що молодший слот дійсно вільний, пристрій прослуховує цей слот протягом U суперкадрів; крім того, протягом цих U суперкадрів пристрій повинен займати останній зайнятий слот. Процедура зсуву бікона називається стисненням бікон-періоду. Вона проводиться всякий раз, коли слот з меншим номером, ніж останній зайнятий, виявляється вільним після приєднання нового пристрою до мережі або після відключення від мережі пристрою, який займав не найстарший з-поміж зайнятих слотів [27].

Через загасання сигналу при його поширенні, через інтерференції та інших ефектів пристрої можуть декодувати кадри не всіх сусідніх пристроїв в мережі. У прикладі на Рис. 3,1 пристрій 4 не може отримувати кадри від пристроїв 2, 3, 5 і 6. Однак це не заважає пристрою 4 правильно розпізнавати зайняті та незайняті бікон-слоти, тому що всі пристрої у своїх біконах розсилають інформацію про становище в бікон-періоді біконів сусідніх пристроїв. Оскільки пристрій 4 отримує бікони від пристрою 1, він знає про існування та місцезнаходження в бікон-періоді пристрою 2. Тому пристрій 4 не стане займати бікон-слот, зайнятий пристроєм 2, попри те, що біконів від пристрою 2 пристрій 4 безпосередньо не отримує.

Стиснення бікон-періоду охоплює всі пристрої в мережі, і процес стиснення стає складним, коли кілька пристроїв підключаються до мережі і відключаються від неї одночасно. Мобільність пристроїв, яку сучасні пристрої не можуть не підтримувати, різко підвищує ймовірність подій, що призводять до стиснення бікон-періоду, тому процес стиснення повинен відбуватися по можливості швидко.

До складних ситуацій слід також віднести інтерференцію декількох пікомереж. Різні пікомережі можуть опинитися в зоні взаємної чутності через рух пристроїв, а також внаслідок так званого ефекту відкривання/закривання дверей.

3.2. Вимоги синхронізації в IEEE 802.15.4

Специфікація IEEE 802.15.4 постійно доповнюється новими частотними діапазонами, методами модуляції та розширення спектру.. Підвищуються також і доступні швидкості передачі даних.

Здавалося б, мережі IEEE 802.15.4 в принципі не призначені для пристроїв, які передають великі обсяги даних і вимагають високої пропускної здатності. Саме збільшення швидкостей передачі пов'язано і з помітним підвищенням споживання кінцевими пристроями, багато з яких в мережах IEEE 802.15.4 працюють автономно. Тому може здатися, що наповнення стандарту все більш високошвидкісними каналами позбавлене сенсу. Однак існують спеціальні механізми, які дозволяють пристроям в мережах IEEE 802.15.4 працювати тільки в невеликі проміжки часу. І такі проміжки будуть тим менше, чим швидше пристрій здатний передати або прийняти всі необхідні в цей момент дані.

Доступ до каналу IEEE 802.15.4 заснований на принципі множинного доступу з прослуховуванням несучої хвилі та униканням колізій (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance — CSMA-CA) або ALOHA. Підтримуються як Мережі без маячків, так і з маячками.

У мережах без маячків (Nonbeacon-enabled personal area network) колізій (збігів) схильні тільки jam-сигнали, що втілюють передачу. Коли пристрій планує почати передачу, він посилає в мережу спеціальний Jam-сигнал і деякий час очікує аналогічних сигналів від інших джерел випромінювання. Якщо Jam-сигналів від інших передавальних пристроїв не надходить, пристрій починає передачу. Якщо ж виявляється "чужий" сигнал, то передавач «засинає» на випадковий проміжок часу, а потім знову пробує почати передачу. В такому випадку одночасно передача може виходити тільки від одного пристрою, що підвищує продуктивність мережі. Однак необхідність очікування вільного каналу позначається на швидкості обміну повідомленнями. Саме тому, мережі IEEE 802.15.4 не є самими високошвидкісними. Разом з тим, принцип CSMA-CA

дозволяє пристроям в мережі IEEE 802.15.4 працювати дуже економно.

У мережах з маячками (Beacon-enabled personal area network) використовується слотовий (тактований) механізм CSMA-CA або ALOHA, в якому початок тимчасового слота має збігатися з кордоном суперфрейма мережевого координатора, тобто початок тимчасового слота для кожного пристрою має бути синхронізовано з початком передачі сигналу маячка мережевим координатором. Оскільки пристрій не може почати передачу, поки не прийме маячок, а маячки розсилаються тільки мережевим координатором, то мережевий координатор за допомогою маячків виконує тактування актів обміну у всій мережі. При цьому на фізичному рівні (PHY) забезпечується загальна Синхронізація, тобто всі передачі в мережі починаються одночасно з початком слотів. Введення описаної синхронізації дозволяє зменшити ймовірність одночасної передачі повідомлень декількома вузлами мережі й збільшує її загальну пропускну здатність. Крім того, в мережах з маячками приймальний тракт кінцевого пристрою не потрібно залучати безперервно — для економії енергії він може бути знеструмлений і включатися тільки на короткі інтервали часу для прийняття даних або синхронізації по маячках.

Таким чином, механізми множинного доступу і маякової синхронізації мають на увазі відключення приймально-передавальних трактів пристроїв при відсутності даних для пересилання, забезпечуючи низьке енергоспоживання пристроїв, з'єднаних за стандартом IEEE 802.15.4. В результаті час автономної роботи кінцевих пристроїв може вимірюватися роками. Важлива особливість протоколу в тому, що подібні відключення не позначаються на збереженні з'єднання на MAC-підрівні. Розробники стандарту основний упор робили на швидкість процесів конфігурування і переконфігурування мережі. Наприклад, перехід приймача в активний стан займає близько 15 мс, а додавання пристрою в мережу — близько 30 мс. Мережі WiFi й Bluetooth не можуть забезпечити такої швидкодії.

3.2.1. Синхронізація в протоколі ZigBee

Часовий поділ ZigBee базується на використанні режиму синхронізації, при якому підлеглі мережеві вузли більшу частину часу перебувають у «сплячому» стані, періодично «прокидаючись» для обміну даними з координатором або синхронізації з координатором. Координатор керує обміном, виділяє частотні канали та синхронізує обмін з періодом від 15 мс до 252 с. Передача сигнальних пакетів дозволяє визначити пропускну здатність, час очікування черги доступу і виділення 16 часових інтервалів однакової довжини, з яких виключені колізії в мережі. Часовий інтервал доступу для кожного вузла мережі може бути визначений координатором, або за допомогою механізму CSMA-CA. Інтервали спокою зображені рис.3.3 необхідні для забезпечення енергозберігаючого режиму вузла-координатора, при функціонуванні від автономного джерела живлення [28].

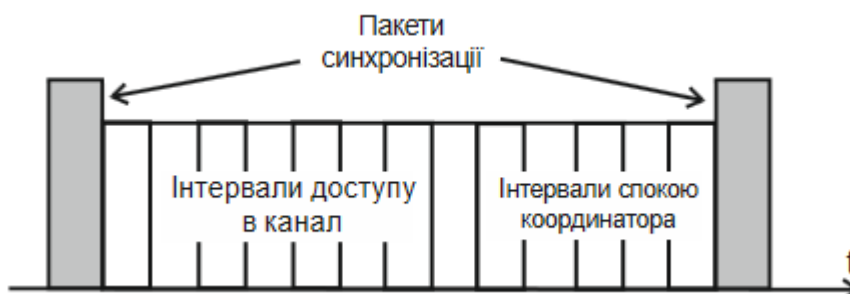


Рисунок 3.3-Синхронізація доступу в мережі ZigBee

Пакети синхронізації повинні слідувати з певними інтервалами. Синхронізований доступ дозволяє значно спростити програмну реалізацію вузла-координатора завдяки відсутності випадкових пересилань від кінцевих вузлів. Реалізація бездротової мережі можлива і без використання стека ZigBee (під стеком розуміється ієрархічний набір програм). Будь-який стек може використовувати рівні MAC і PHY стандарту IEEE 802.15.4.

Основні проблеми синхронізації

Фірма-виробник трансиверів типу CC2520, в обґрунтувала необхідність застосування режиму економії електроживлення для цих трансиверів. З аналізу потоків обміну випливає, що кожному кінцевому вузлу необхідно 7 мС часу на прийом-передачу, 3 мС – на перехід трансивера зі сплячого режиму в робочий. Розумним буде відвести ще 2 мС на попередження переходу трансивера в робочий режим перед початком передачі вузлом-координатором. Таким чином, загальний час знаходження трансивера в робочому стані дорівнюватиме 12 мс. Нехай кожен периферійний вузол викликається 1 раз в секунду. Тоді при вихідній потужності пере-датчика 0 dBm, струм споживання складе 25 мА при 25°C (струм залежить від температури). Двох батарейок типу AA буде достатньо для живлення протягом 2400 годин або 100 діб. З цього випливає, що годинник системи повинні бути синхронізовані з точністю не гірше, ніж $\pm 0,5$ мС. Власне трансивер типу CC2520 не володіє ніякими ресурсами для реалізації годин реального часу і, тим більше для їх синхронізації з іншими пристроями. Ця робота цілком лягає на керуючий МК. Зі специфікацій МК типу STM32F100RC відомо, що він містить годинник реального часу (RTC), що йдуть від зовнішнього кварцу частотою 32768 Гц, декількох таймерів, тактируємих від системної шини, таймер типу WWDG («сторожова собака»), тактируємий від системної шини, таймер типу IWDG («незалежна сторожова собака»), тактируємий від окремого RC-генератора. Для даного завдання найбільш цікавим представляється таймер IWDG. З рисунку 3.4 нижче видно, що таймер IWDG переведе МК в стан системного скидання з будь-якого поточного стану. Це означає, що МК можна поставити в режим зниженого енергоспоживання типу «Sleep mode», запустити IWDG. Після заданого часу МК "прокинеться" і буде готовий до роботи [29].

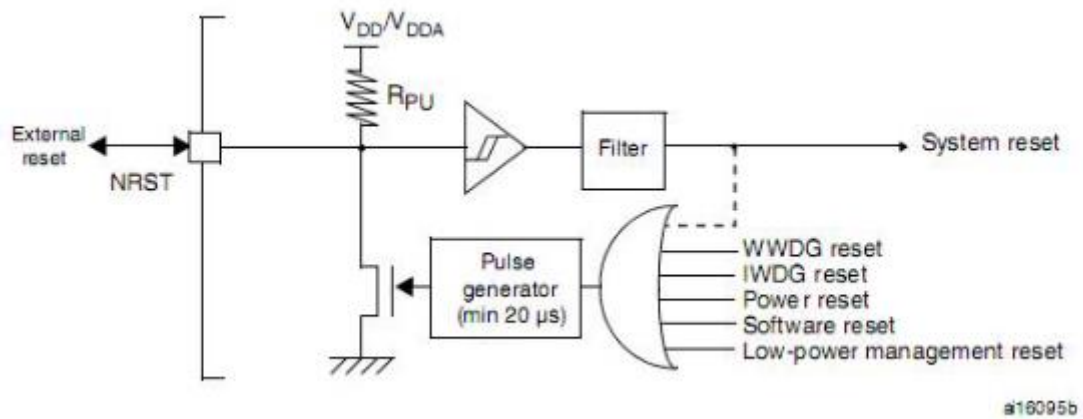


Рисунок.3.4-Схема збросу МК типу STM32F100RC

Далі будуть розглянуті питання точності роботи RTC, прив'язка часу спрацьовування WDT до RTC і спосіб корекції зв'язки IWDG і RTC як елемента синхронізація часу у вузлах бездротової мережі.

Годинники RTC працюють від зовнішнього кварцу, частотою 32768 Гц, мають низьку стабільність ± 36 ppm ($1 \text{ ppm} = 0,0001\%$) і енергоспоживання близько 1,4 мкА. На рисунку 3.5 нижче показана типова схема RTC.

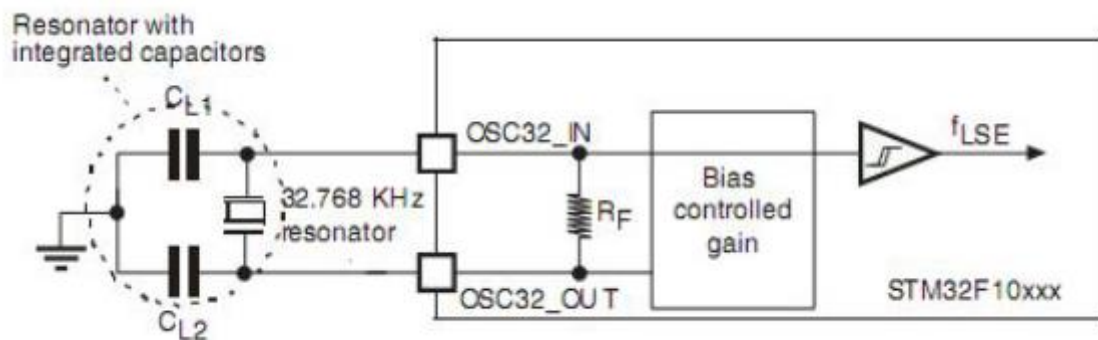


Рисунок. 3.5-Структурна схема генератора RTC

Структура RTC містить механізм, що дозволяє відкалібрувати частоту вручну або автоматично, за допомогою зовнішнього еталонного генератора. Однак це не означає, що може бути зрушене фазування зовнішнього резонатора. Практично це означає, що всі RTC всіх вузлів мережі можуть йти з високою

абсолютною точністю в межах секундного інтервалу (тобто їх «догляд» за добу може бути мінімальним), але фронти секундних імпульсів будуть починатися в різний час (рис. 3.6)

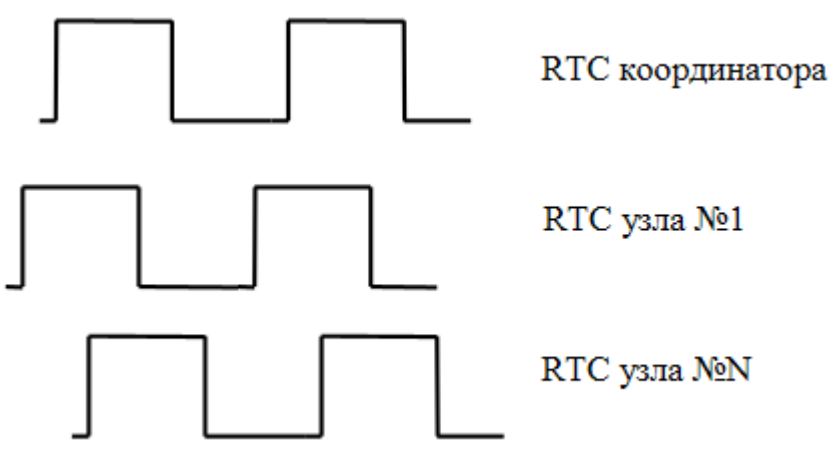


Рисунок. 3.6 - Взаємна розсинхронізація генераторів RTC

Таймер типу IWDG («незалежна сторожова собака») тактується від окремого RC генератора, характеристики якого показані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 Характеристики LSI генератора

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
f_{LSI}	Frequency	30	40	60	kHz
$\Delta f_{LSI(T)}$	Temperature-related frequency drift ⁽²⁾	-9		9	%
$t_{su(LSI)}^{(3)}$	LSI oscillator startup time			85	μs
$I_{DD(LSI)}^{(3)}$	LSI oscillator power consumption		0.65	1.2	μA

Зауваження 2 і 3 говорять про те, що ці дані не тестуються, а гарантуються конструкцією. Також обмовляється, що частота генератора залежить від напруги живлення, але практично не залежить від температури в діапазоні від -40 до 105 °C. Частота генератора 30..60 кГц еквівалентна періодам часу 33..16 мкс. Блок-схема таймера IWDG показана на рисунку 3.7 нижче.

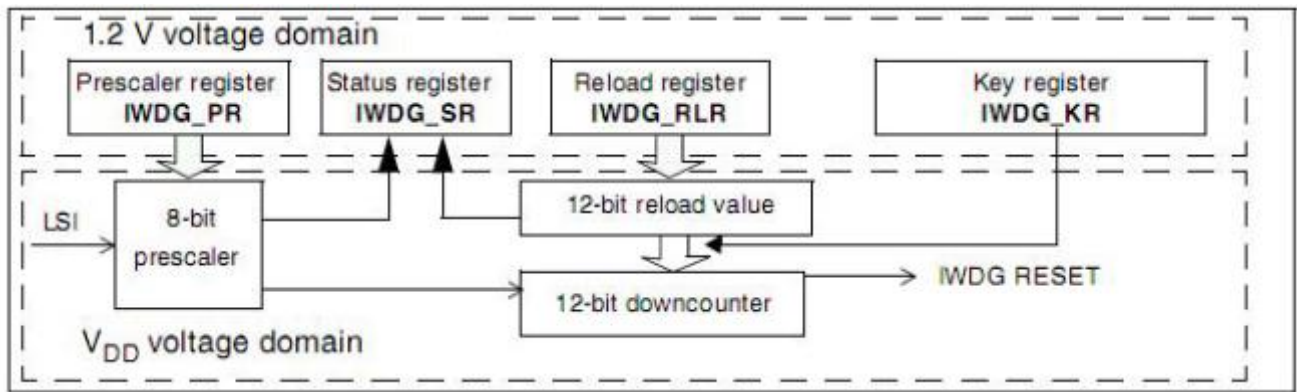


Рис. 3.7. Блок-схема таймера IWDG

Функція IWDG реалізується в області напруги VDD, яке доступне також в режимах Stop і Standby.

Очевидно, що досить встановити точне поточне значення LSI генератора, від якого тактується таймер IWDG, щоб визначити з високою точністю час «прокидання» вузла NX пристрою спільно з роботою RTC. Для цього необхідно знати скільки імпульсів встигає відрахувати таймер WDT за 1 Сек. Але тут для МК сімейства STM32F10x є ряд перешкод. У сімействі немає доступу до "12 bitdown-counter" (див. 5), що входить до складу таймера IWDG. Це означає, Що по перериваннях від секундних імпульсів неможливо встановити, скільки нарахував таймер EWD. У сімействі просто немає регістра, який дозволяє визначити, скільки тактів частоти 32768 кГц укладається між двома перериваннями від таймера IWDG. Тому завдання визначення частоти LSI генератора доводиться вирішувати ітераційним шляхом, суть якого зводиться до наступного [29].

Позначимо через F_{LSE} частоту генератора для RTC, через F_{LSI} - частоту генератора для IWDG, через RTC_PRL - період, що завантажується в таймер RTC для відліку 1 Сек, через IWDG_RLR - період, що завантажується в таймер IWDG. Якби виконувалося рівність $F_{LSE} = F_{LSI}$, то для відліку 1 Сек в *RTC PRL* и *IWDG RLR* можна було завантажувати однакові значення або інакше виконувалося б співвідношення:

$$F_{LSI} = F_{LSE} * \frac{RTC_PRL}{IWDG_RLR} \quad (1)$$

З (1) випливає, що шукана частота генератора таймера IWDG:

$$F_{LSI} = F_{LSE} * \frac{RTC_PRLL}{IWDG_RLR} \quad (2)$$

Пакет адаптивної синхронізації

Нехай при включенні нового вузла X_n в мережу, для нього в пакеті синхронізації передається повне, 32 бітове значення RTC вузла-координатора, отримане значення RTC замінює поточне значення RTC вузла X_n , згідно (2) обчислюється значення $Lsif$ для вузла X_n і вузол X_n залишається в активному режимі. У трансивері типу CC2520 є сигнал SFD, який на стороні передавача встановлюється в «0» по завершенні передачі, а на стороні приймача встановлюється в «0» по завершенні "правильного приймання" (тобто збігаються адреси, КС). На часовій діаграмі нижче показані графіки досліджуваних сигналів.

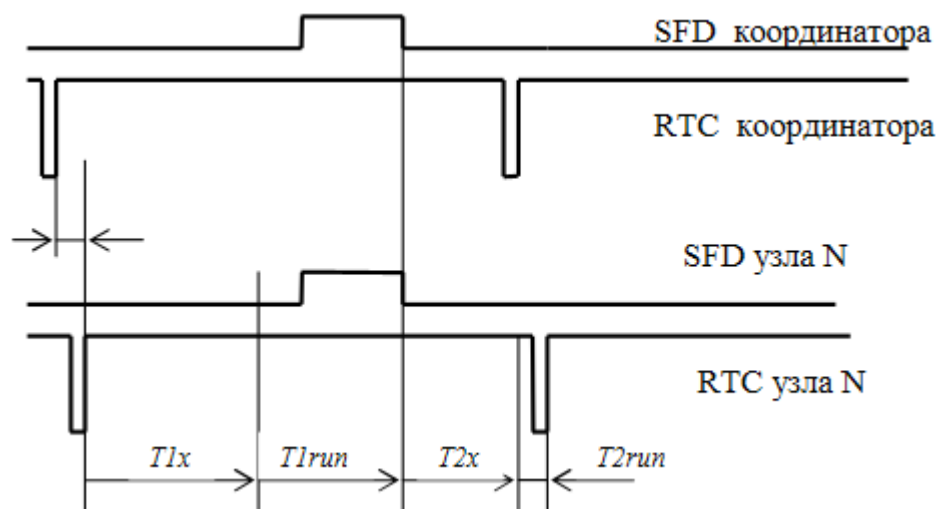


Рисунок 3.8-Графіки сигналів

При отриманні другого пакета синхронізації вузлом X_n визначається час $T1$, протягом якого вузол X_n може перебувати в сплячому режимі, без ризику пропустити сеанс зв'язку з координатором. Також визначається час робочого режиму $T1runx$ і час $T2$, протягом якого вузол X_n може перебувати в сплячому режимі без ризику пропустити секундний імпульс RTC вузла XN . Час активного режиму $T2runx$ визначає час активного режиму-очікування секундного імпульсу

RTC вузла X_n .

При наступних сеансах зв'язку координатора з вузлом X_n , для вузла X_n проводиться мінімізація часів $T1_{runx}$ і $T2_{runx}$.

Практична програмна реалізація показала, що можлива Синхронізація процесів в мережі і з меншою похибкою, ніж $\pm 0,5$ мС, але це справедливо тільки для стійкого зв'язку. При появі збоїв зв'язку координатору і вузлам, з якими втрачено зв'язок, доведеться збільшити часи активних режимів, збільшити число пакетів зв'язку і, можливо, заново провести синхронізацію в мережі.

3.3.Висновки до розділу 3

1. В даному розділі розглядається механізми синхронізації в бездротових персональних мережах з розподіленим управлінням на MAC-рівні. Основна увага приділена мережі зі складною структурою в разі одночасного, або майже одночасного, приєднання до мережі декількох пристроїв, що нерідко трапляється при об'єднанні декількох мереж, зміні робочої частоти та в інших випадках. Механізми, описані в стандарті WiMedia, дають збої й призводять до частих конфліктів між пристроями, блокування мережі, а в деяких випадках можуть привести до «зависання» мережі – тупиковим ситуаціям, з яких можна вийти, тільки вимкнувши пристрої й включивши їх заново.

2. Розглянуто підхід до реалізації синхронізації в бездротовій мережі, типу ZigBee (IEEE 802.15.4), в діапазоні 2,4 ГГц з топологією «зірка», в якій є в точності один вузол – координатор і безліч периферійних вузлів. Реалізація не вимагає застосування додаткових мікросхем і на стандартних таймерах мікроконтролера типу STM32F100RC дозволяє досягти точності синхронізації $\pm 0,5$ мС.и .Реалізація синхронізації дозволяє працювати периферійному вузлу бездротової мережі до 100 днів від 2 батарейок типу АА. Дана реалізація синхронізації працює повністю в автоматичному режимі як при налаштуванні, так і при експлуатації бездротової мереж

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі розглянуто методи синхронізації в бездротових персональних мережах на базі високошвидкісних та низькошвидкісних мереж.

Мета, котра була поставлена перед виконанням роботи, виконана, а отримані результати в ході виконання дипломної роботи відповідають сформульованим завданням і повністю задовольняють їх. Для досягнення мети були зроблені такі дії:

1) У першому розділі був проведений огляд систем бездротових персональних мереж. Сучасні персональні бездротові можуть бути реалізованими за допомогою таких технологій як:

- o Bluetooth
- o UWB
- o Wireless USB
- o HomeRF
- o IrDa

2) У другому розділі був проведений детальний аналіз високошвидкісних та низькошвидкісних мереж стандартів IEEE 802.15.3 та IEEE 802.15.4 відповідно. А саме: призначення, принципи роботи, структура та топологія. Саме ці мережі були обрані для подальшого аналізу механізмів синхронізації

3) У третьому розділі розглядається механізми синхронізації в бездротових персональних мережах з розподіленим управлінням на MAC-рівні на основі протокол IEEE 802.15.3 також розглянуто підхід до реалізації синхронізації в бездротовій мережі, типу ZigBee (IEEE 802.15.4).

Отже, я вважаю, що поставлена мета виконана.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. IEEE Std 802.15.1-2005 – Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Standards Association. doi:10.1109/IEEESTD.2005.96290.
2. IEEE IEEE 802.15 WPAN Task Group 1 (TG1). official web site. IEEE Standards Association (February 9, 2004).
3. IEEE IEEE 802.15 WPAN Task Group 1 (TG1). official web site. IEEE Standards Association (February 9, 2004).
4. IEEE Std 802.15.2-2003 – Part 15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands. IEEE Standards Association (2003). doi:10.1109/IEEESTD.2003.94386.
5. IEEE 802.15 WPAN Task Group 6 (TG6) Body Area Networks. IEEE Standards Association (9 Jun 2011).
6. IEEE launches new working group for Body Area Network tech. arstechnica.com.
7. Kyung Sup Kwak; Sana Ullah & Niamat Ullah (2011), An Overview of IEEE 802.15.6 Standard, pp. 1–6, arXiv:1102.4106 [cs.NI]
8. IEEE 802.15 WPAN Task Group 7 (TG7) Visible Light Communication. IEEE Standards Association (April 9, 2011).
9. IEEE 802.15 WPAN SCwng Wireless Next Generation Standing Committee(nov-2011).
10. Два в одному. – CHIP, №10, жовтень 2009, с. 20 – 21.
11. Bluetooth: від А до Я. – MOBILux, №2 (39), лютий 2008, с. 32 – 33.
12. <http://www.bluetooth.org> — офіційний сайт групи розробників технології (містить специфікації)
13. https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2020/01/Bluetooth_5.2_Feature_Overview.pdf
14. SIG introduces Bluetooth 4.2
15. Bluetooth 5.0: Here's Why The New Wireless Standard Matters

16. Bluetooth 5.0 to Quadruple Range, Double Speed | News & Opinion | PCMag.com
17. *Cris Hoffman*. Bluetooth 5.1: What's New and Why It Matters (неопр.). How to geek (31 січня 2019).
18. https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2020/01/Bluetooth_5.2_Feature_Overview.pdf
19. <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/recent-enhancements/le-audio/>
20. <https://nvgn.ru/blog/technologiya-uw-b-osobennosti-primeri-ispolzovaniya/>
21. <https://web.archive.org/web/20050715031009/http://www.usb.org/wusb/home>
22. <https://www.usb.org>
23. Wayne Caswell (November 17, 2010). "HomeRF Archives". Retrieved July 16, 2011.F
24. Шахнович І. В. сучасні технології бездротового зв'язку. Видання друге, виправлене і доповнене. - Москва: Техносфера, 2006. - 288 с.
25. dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/530/1/UIZ_2013.pdf.
26. Mottola L. Programming wireless sensor networks: Fundamental concepts and state of the art / L.Mottola, G.P.Picco // ACM Computing Surveys. – 2011. –No3.– P. 51
27. В. М. Вишневський, А. І. Ляхов, А. А. Сафонов, Дослідження ефективності механізмів синхронізації в бездротових персональних мережах зі складною структурою, ІТОС, 2008, випуск 3, 63-77.
28. <https://www.nxp.com/files-static/abstract/global/s50214.pdf>
29. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/85152/50-Polivtsev.pdf?sequence=1>.